

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto

Puunjalostustekniikan laitos

PENTTI PUTKINEN

ERÄÄN HIENOPAPERIKONEEN JAUHATUKSEN OPTIMOINTI

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 31.07.1995.

Työn valvoja

Prof. Hannu Paulapuro

Työn ohjaajat

FM Markku Johansson

DI Matti Sipilä

Tekijä, työn nimi

Pentti Putkinen

Erään hienopaperikoneen jauhatuksen optimointi

Päivämäärä: 31.07.1995

Sivumäärä: 106

Osasto, laitos, professuuri

Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto, Puunjalostustekniikan laitos,
Puu-21 Paperitekniikka

Työn valvoja

Prof. Hannu Paulapuro

Työn ohjaajat

FM Markku Johansson, DI Matti Sipilä

Kirjallisuusosassa tavoitteena oli laatia kopiopaperille tuoteanalyysi ja selvittää sen perusteella kopiopaperin tärkeimpien ominaisuuksien ja jauhatuksen väliset riippuvuudet. Tätä varten käytiin seikkaperäisesti läpi matalasakeusjauhatuksen mekanismi, sen hallinta ja lopputulokseen vaikuttavat tekijät. Lisäksi pyrittiin löytämään kopiopaperille optimaaliset jauhatusolosuhteet (jauhatustapa ja -määrä).

Tuoteanalyysin perusteella kopiopaperin tärkeimpiä tilasuureita ovat dimensiostabiliteetti (kayristuminen ja kupruilu), kuumennuksen kestävyys, formaatio, huokoisuus, sileys, jäykkyys ja vaaleus.

Kokeellisen osan tavoitteena oli kartoituskoeajoilla selvittää uusitun PK 9:n jauhatusjärjestelmän toiminta. Pilotkoeajoilla selvitettiin eri terägeometrioiden soveltuminen kopiopaperimassakomponenttien jauhatukseen sekä selvitettiin männyn kuivatushistorian merkitys. Tehdaskoeajon esikokeilla pyrittiin löytämään optimaaliset jauhatussakeudet koivu- ja mäntymassoille sekä selvitettiin pH:n ja Ca^{2+} -ionipitoisuuden kehittyminen prosessissa. Lopuksi tehdaskoeajolla selvitettiin tehdasmittakaavassa koivun ja männyn jauhatuksen määrien, männyn putkimassan osuuden ja hylyn määrän merkitystä lopputuotteeseen sekä pyrittiin luomaan kriteerit terien vaihtovälin määrittämiseksi.

Sakeuskoeajon tulosten perusteella todettiin koivu- ja mäntymassojen jauhautuvuuden kehittymisen nopeutuvan sakeuden kasvaessa. Varsinkin koivulla jauhatussakeutta voitiin pitää merkittävänä muutuja, koska pidettäessä jauhatustapa ja -määrä vakioina saatiin sakeuden muuttuessa 3,8 %:sta 4,7 %:iin 75 ml:n muutos freenessissä. Optimaaliseksi jauhatussakeudeksi kopiopaperin tehdasjauhatukseen saatiin koivulle 4,5 - 4,7 % ja männylle 4,1 - 4,3 %.

Pilotkoeajossa todettiin paalimäntymassan (kap. 90 %) selvästi erilainen jauhatuskäyttäytyminen kuin putki ja puolikuivalla (50 % kuivattu kap. 80 %:iin ja 50 % kuivaamatonta) mäntymassoilla. Tulosten perusteella todettiin putki ja puolikuivan mäntymassan kopiopaperitekniinen potentiaali samanlaiseksi.

Siirryttäessä tehdasjauhatuksessa LM-teritykseen voitiin jauhatuskapasiteetin todeta lisääntyvän 20 - 30% jauhettaessa samaan freeness-tasoon. Katkovan TM-terityksen käyttö männyn viimeisenä jauhatusvaiheena paransi kopiopaperimassan formaatiopotentiaali ja pienensi kuivauskutistumaa sekä huokoisuutta verrattuna fibrilloivalla viimeisen vaiheen terityksellä jauhetettuun massa.

Koivun jauhatuksessa terityksellä ei todettu yhtä suurta vaikutusta massan jauhautumiseen kuin männyllä. Myöskään linjojen eri jauhien lukumäärät eivät vaikuttaneet jauhatustulokseen, vaan jauhatusmäärä oli ratkaisevin tekijä.

Kopiopaperin ominaisuuksien kannalta koivumassaa tulee jauhaa varovaista jauhatustapaa (n. 1 J/m) käyttäen verraten pitkälle, koska näin saavutetaan kopiopaperille pieni huokoisuus, tosin kuivauskutistuman kasvun kustannuksella. Mäntymassaa tulee jauhaa selvästi rajummin (3 - 4 J/m). Männyn jauhatuksen määrällä kopiopaperissa on optimi kuivauskutistuman suhteen. Kopiopaperin optimaaliseksi jauhatusmääräksi saatiin koivulle 70 - 90 kWh/t ja männylle 120 - 140 kWh/t ja teritykseksi Jylhä Conflo jauhimiin koivulle SC-teritys ja männylle LM-teritys.

Author and name of the thesis:

Pentti Putkinen

Optimation of a Finepaper Machine's Refining

Date: 31.7.1995

Number of pages: 106

Faculty:

Faculty of Process Engineering and Materials Science

Professorship:

Paper Technology, Puu-21

Supervisor:

Prof. Hannu Paulapuro

Instructors:

FM Markku Johansson

DI Matti Sipilä

The aim of the literature part was to analyse copying paper as a product, and after this find out how much the characteristics of copying paper depend on refining. Because of this the mechanism of low consistency refining, and how to drive it, were searched carefully. Also defining the optimised refining conditions was one of the goals for the literature part.

As a result of the analyse it can be said that the main state values for copying paper are dimensional stability (curl and cockling), ability to deal with heating, formation, porosity, smoothness, stiffness and brightness.

The goal for the experimental part was to discover the function of the refining system of repaired PM 9. The method for this was test drives. First studied which plate designs suit best for refining the components of copying paper pulp. Also the meaning of pine pulp's drying history was discovered. Second step was to find optimised refining consistency for both birch and pine pulps. And how the concentration of pH and Ca^{2+} -ion develop during the process. For the last, it was worked out how the amount of refining, share of wet (not dried) pine pulp and reject amount influence the end product. Also the criterias for the most suitable time period between plate changes were searched.

As a result of the concentration test drive it can be said that both birch and pine pulps refining develop faster when pulp consistency grows. Especially for birch refining concentration is a significant variable, when both refining method and refining amount were kept stable and concentration changed from 3,8 % to 4,7 % the change in freeness was 75 ml. The optimised refining concentrations at the mill are at the following levels, birch 4,5 - 4,7 % and pine 4,1 - 4,3 %.

At the pilot test drive the dried pine pulp (dry matter content 90 %) acted very differently than the mixture of wet and half wet (50 % of pulp dried to dry matter content 80 % and 50 % not dried) pulps. The result was that the paper technological potential of wet and half wet pulp is the same.

Filling type LM at the mill would give 20 - 30 % more refining capacity, when pulp is refined to the same freeness level. Also filling type TM, when used for pine pulp as the last refining step, gave better formation potential and decreased drying shrinkage and porosity compared to pulp refined by filling type LM.

Filling types did not have as much role when refined pulp was birch. The most important variable for birch pulp is the amount of refining.

When thinking the quality of the copying paper birch pulp should be refined quite a lot by careful refining method (about 1 J/m). In this way a low porosity can be achieved. Pine pulp should be refined by much harder method (3 - 4 J/m). The optimised refining amounts for copying paper are the following: birch pulp 70 - 90 kWh/t and pine pulp 120 - 140 kWh/t. The most suitable filling type for birch is SC and for pine LM, when the refiners used are Jylhä Conflo.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Kymin Paperiteollisuus Oy:n toimeksiantona. Työhön liittynyt pilottutkimus suoritettiin Sunds Defibrator Jylhä Oy:n jauhinkoeasemalla Valkeakoskella ja tehdaskokeet Kymin Paperiteollisuus Oy:n PK 9:llä.

Työni valvojalle, Prof. Hannu Paulapurolle Teknillisen Korkeakoulun Paperitekniikan laboratoriolta, sekä ohjaajilleni FM Markku Johanssonille ja DI Matti Sipilälle Kymin Paperiteollisuus Oy:stä sekä Ins. Jorma Lumiaiselle Sunds Defibrator Jylhä Oy:stä esitän parhaat kiitokseni. Lisäksi haluan kiittää kaikkia työssäni minua auttaneita henkilöitä, erityisesti Kymin Paperiteollisuus Oy:n Kuusankosken tutkimuskeskuksen massa- ja paperilaboratorioiden henkilökuntaa sekä PK 9:n käyttöhenkilökuntaa.

Kuusankoskella 31.07.1995



Pentti Putkinen

KIRJALLISUUSOSA

1. JOHDANTO.....	1
1.1 Työn tausta ja tavoitteet.....	1
1.2 Työn rakenne.....	2
2. KOPIO- JA TULOSTUSPAPERIN KÄYTTÖKOHTEET.....	3
3. TUOTEANALYYSI.....	5
3.1 Yleistä.....	5
3.2 Kopio- ja laserpaperi.....	5
3.2.1 Dimensiostabiliteetti ja kuumennuksen kestävyys.....	5
3.2.2 Pintaominaisuudet.....	6
3.2.3 Sähköiset ominaisuudet.....	7
3.2.4 Optiset ominaisuudet.....	8
3.2.5 Muut ominaisuudet.....	8
3.3 Ink jet -tulostuspaperi.....	11
3.4 Offset- ja kirjekuoripaperi.....	12
4. KOPIOPAPERIN TÄRKEIMMÄT LAATUOMINAISUUDET JA NIIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	13
4.1 Dimensiostabiliteetti eli mittapysyvyys.....	13
4.1.1 Yleistä.....	13
4.1.2 Kosteuslaajenema ja kuivauskutistuma.....	13
4.1.3 Käyristyminen.....	14
4.1.4 Kupruilu.....	16
4.2 Formaatio.....	17
4.3 Huokoisuus.....	19
5. SELLUN JAUHATUS.....	21
5.1 Yleistä.....	21
5.2 Jauhatuksen käsitteitä.....	21
5.3 Jauhatuksen mekanismi.....	22
5.4 Jauhatuksen perusvaikutukset.....	23
5.4.1 Primäärikalvon poistuminen ja sisäinen fibrillaatio.....	25
5.4.2 Ulkoinen fibrillaatio.....	25
5.4.3 Kuitujen katkeilu.....	26
5.4.4 Hienoaineen muodostuminen.....	26
5.4.5 Kuidun komponenttiaineiden liukeneminen.....	26
5.4.6 Jauhatuksen perusvaikutusten yhteenveto.....	26
5.5 Hienopaperimassan jauhatuksen vaikutus sulppuun ja paperiin.....	27
6. JAUHATUKSEN HALLINTA.....	29
6.1 Yleistä.....	29
6.2 Jauhatusteoriat.....	29
6.2.1 Ominaisrämmäkuormateoria.....	30
6.2.2 Ominaispintakuormateoria.....	32

7. JAUHATUSTULOKSEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	35
7.1 Yleistä.....	35
7.2 Perityt tilasuureet.....	35
7.2.1 Kuitumorfologia.....	35
7.2.2 Massan valmistusmenetelmä.....	36
7.2.3 Massan kuivatushistoria.....	37
7.3 Hallitut tilasuureet.....	38
7.3.1 Sakeus.....	38
7.3.2 Kemiallinen ympäristö.....	39
7.3.3 Lisäaineet.....	40
7.3.4 Muut.....	41
7.4 Jauhimen aktiiviset hallintasuureet.....	41
7.5 Jauhimen passiiviset hallintasuureet.....	42
7.5.1 Yleistä.....	42
7.5.2 Terägeometria.....	43
7.5.3 Pyörimisnopeus- ja suunta.....	48
7.6 Jauhatusjärjestelmä.....	49
7.6.1 Jauhatuskytkentä.....	49
7.6.2 Energianjako jauhimien kesken.....	50
8. KOPIOPAPERIN OPTIMAALISET JAUHATUSOLOSUHTEET.....	51
9. KIRJALLISUUSOSAN YHTEENVETO.....	53

KOKEELLINEN OSA

10. PK 9:n JAUHATUS- JA KIERTOJÄRJESTELMÄ.....	55
10.1 Jauhatusjärjestelmä.....	55
10.2 Kiertovesijärjestelmä.....	57
11. KARTOITUSKOEAJO.....	58
11.1 Tavoite.....	58
11.2 Koesuunnitelma.....	58
11.3 Tulokset.....	58
11.4 Yhteenveto.....	59
12. SAKEUSKOEAJO.....	60
12.1 Tavoite ja toteutus.....	60
12.2 Tulokset ja johtopäätökset.....	60
12.2.1 Männyn jauhatussakeus.....	60
12.2.2 Koivun jauhatussakeus.....	61
12.3 Yhteenveto.....	62
13. Ca²⁺-IONIPITOISUUDEN SELVITYS.....	64
13.1 Tavoite ja toteutus.....	64

13.2 Tulokset ja johtopäätökset.....	64
13.3 Yhteenveto.....	66
14. PILOTKOEAJO.....	67
14.1 Tavoite.....	67
14.2 Koesuunnitelma.....	67
14.3 Tulosten tulkitseminen.....	69
14.4 Tulokset ja johtopäätökset.....	70
14.4.1 Mäntymassan jauhatus.....	70
14.4.2 Koivumassan jauhatus.....	75
14.4.3 Kopiopaperimassaseos.....	77
14.5 Yhteenveto.....	82
15. TEHDASKOEAJO.....	84
15.1 Tavoite.....	84
15.2 Koesuunnitelma.....	84
15.3 Toteutus.....	85
15.4 Tulosten tulkitseminen.....	86
15.5 Tulokset ja johtopäätökset.....	87
15.5.1 Mänty- ja koivumassan jauhatus.....	87
15.5.2 Perälaatikkonäytteet.....	90
15.5.3 Paperinäytteet.....	91
15.6 Yhteenveto.....	95
16. TERÄN VAIHTOVÄLI.....	97
17. JOHTOPÄÄTÖKSET HIENOPAPERIKONEEN JAUHATUKSEN OPTIMOINNISTA.....	99
17.1 Johtopäätökset.....	99
17.2 Jatkotoimenpide-ehdotukset.....	100
17.3 Muita huomioita.....	101
18. TULOSTEN TARKASTELUA.....	103
19. KOKEELLISEN OSAN YHTEENVETO.....	105

LÄHDELUETTELO

LIITTEET

KIRJALLISUUSOSA

1. JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Kymin Paperiteollisuus Oy:n PK 9 valmistaa päätuotteena korkealuokkaista puuvapaa- ta pintaliimattua kopiopaperia noin 300 000 t/a. Hyvän markkinatilanteen seurauksena on ollut paineita lisätä tuotantokapasiteettia. PK 9:llä siihen on pyritty jouluna 1994 uusitulla pintaliimauslaitteistolla ym. toimenpiteillä. Uudistusten yhteydessä muutettiin myös jauhatusjärjestelmää, koska vanha kytkentä ei pystynyt läpäisemään kasvannutta massavirtaa. Näin syntyi tarve selvittää uusitun jauhatusjärjestelmän nykytilanne ja parantaa sen toimintaa.

Diplomityö jakautuu kirjallisuusosaan ja kokeelliseen osaan. Kirjallisuusosan tavoitteena on selvittää seuraavia seikkoja:

- Laatia kopiopaperin tuoteanalyysi ja selvittää muiden PK 9:llä valmistettavien laatu- ja erityisominaisuuksia
- Selvittää miten kopiopaperin ominaisuuksiin voidaan jauhatuksella vaikuttaa
- Selvittää tärkeimpien tilasuureiden syntymekanismeja
- Käydä läpi matalasakeusjauhatuksen mekanismi, hallinta ja lopputulokseen vaikuttavat tekijät
- Löytää kirjallisuuden perusteella kopiopaperille optimijauhatusolosuhteet

Kokeellisen osan tavoitteet:

- Selvittää PK 9:n uusitun jauhatusjärjestelmän toiminta
- Hakea oikeantyyppinen jauhatuskytkentä- ja säätö mittauksineen
- Hakea oikeantyyppiset terägeomatriat mänty- ja koivujauhimiin
- Selvittää osittain kuivatun (kap. 80 %:iin kuivatun ja kuivaamattoman) mäntymassaseoksen merkitys kopiopaperissa
- Määrittää terien vaihtovälille kriteerit
- Optimoida jauhatus puuttumatta koivu/mänty suhteeseen

1.2 Työn rakenne

Kirjallisuusosan alussa selvitetään yleisellä tasolla kopio- ja tulostuspaperin käyttökoh- teita. Tämän jälkeen kopiopaperille laaditaan tuoteanalyysi kirjallisuudesta saatavan ai- neiston perusteella ja selvitetään tuoteanalyysin perusteella tärkeimpien kopiopaperin ominaisuuksien syntymekanismeja ja miten niihin voidaan vaikuttaa jauhatuksella. Li- säksi perehdytään perusteellisesti sellun matalasakeusjauhatukseen, käydään läpi jau- hatuksen mekanismi, sen hallinta ja jauhatustulokseen vaikuttavat tekijät. Lopuksi py- ritään kirjallisuuden perusteella löytämään kopiopaperille optimaaliset jauhatusolo- suhteet.

Kokeellinen osa on jaettu tavoitteen saavuttamiseksi kolmeen pääosaan.

A. Kartoituskoeajo (referenssi)

- jauhatusjärjestelmän toiminnan selvitys

B. Pilotkoeajo

- oikeiden jauhinterägeometroiden hakeminen mänty- ja koivujauhimiin sekä män- nyn kuivatushistorian merkityksen selvitys

C. Optimointikoeajo

- esikokeet
 - koivun ja männyn optimi jauhatussakeuden hakeminen
 - jauhatuksessa vallitsevan Ca^{2+} -ionipitoisuuden ja pH:n selvitys
- tehdaskoeajo
 - kopiopaperin jauhatuksen optimointi

Kokeellisen osan alussa esitellään lyhyesti PK 9:n jauhatus- ja kiertovesijärjestelmä. Kartoituskoeajolla selvitetään jauhatusprosessin tila sekä massojen että paperin omi- naisuuksien suhteen. Pilotkoeajolla tutkitaan pilotmittakaavassa kuivatushistorialtaan erilaisten mäntymassojen jauhautuvuutta ja käyttöpotentiaalia sekä selvitetään eri tyyp- pisten terägeometrioiden soveltuvuutta hienopaperimassan jauhatukseen. Mm. katko- vaa teritystä kokeillaan männyn viimeisenä jauhatusvaiheena. Optimointikoeajon esi- kokeilla selvitetään jauhatussakeuden merkitys sekä tutkitaan jauhatuksessa vallitseva pH ja Ca^{2+} -ionipitoisuus ja niiden muutos jauhatuksen edistyessä. Lopuksi tehdasko- keeseen kerätään kaikki aikaisemmista koeajoista ja kirjallisuudesta saatu tieto ja koke- mus ja haetaan optimaaliset jauhatusolosuhteet.

2. KOPIO- JA TULOSTUSPAPERIN KÄYTTÖKOHTEET

Kopio- ja tulostuspapereita (toimistopaperit) käytetään pääasiassa non-impact (NI) tulostusmenetelmissä, joissa värin siirtyminen paperiin ei perustu iskuun vaan staattisiin sähkövarauksiin, magneettisiin voimiin tai lämpöön. NI-menetelmät voidaan jakaa seuraavasti /1/: elektrofotografia, ink-jet eli mustesuihku, elektrografia, magnetografia sekä termografia. Useimmat ovat jaettavissa vielä suoraan ja epäsuoraan menetelmään, riippuen muodostetaanko kuva suoraan paperille vai ensin rummulle tai hihnalle, josta se siirretään paperille. Taulukossa 1 on esitetty yhteenveto NI-menetelmien käyttöalueista.

Taulukko 1. NI-menetelmien käyttöalueet /1/.

	Kopiointi	Telekopiointi	Tulostus	Elektroninen painatus
Elektrofotografia	xxx	xx	xxx	xxx
Elektrografia			x	x
Magnetografia			x	
Mustesuihku	x	x	xx	x
Termografia		xxx	xx	

xxx käyttö runsasta
xx käyttö kohtalaista
x käyttö vähäistä.

Koko puuvapaan päällystämättömän paperiryhmän kysyntä oli Länsi-Euroopassa vuonna 1991 5,4 milj. tonnia ja sen ennustetaan kasvavan vuoteen 1999 mennessä 7,5 milj. tonniin /2/. Vuotuisaksi kulutuksen kasvunopeudeksi ennustetaan 2,5 % vuosille 1994 - 1999 /2/.

Elektrofotografia eli kserografia (kopiokoneet ja lasertulostimet) on ylivoimaisesti kopio- ja tulostuspapereiden tärkein käyttötapa. Vuonna 1990 on leikattujen arkkien käyttömäärän arvioitu olleen Länsi-Euroopassa noin 2 milj. tonnia /1/ ja vuonna 1993 2,8 milj. tonnia. Vuoteen 1997 mennessä markkinoiden on ennustettu kasvavan 3,4 milj. tonniin noin 6,0 %:n vuotuisalla kasvuvauhdilla /3/. Erään toisen ennusteen mukaan kulutuksen on arvioitu vuonna 1998 olevan 3,7 milj. tonnia vuotuisan kasvuvauhdin ollessa 5,6 %.

Yleisenä piirteenä kopio- ja tulostuspapereiden kulutuksessa on, että varsinainen kopiointi tulee lievästi vähenemmään. Paperiryhmän kulutuksen kasvu johtuu tulostuksen kasvamisesta. Lasertulostus edustaa määrällisesti suurinta ryhmää (ennuste v. 1998

1,35 milj. tonnia). Myös ink-jet -tulostuksen käytön ennustetaan kasvavan henkilökoh-
taisten tulostimien yleistyttyä. Vuonna 1990 on paperin kulutuksen ink-jet käytössä ar-
vioitu olleen noin 0,02 milj. tonnia /1/ ja vuonna 1993 0,08 milj. tonnia. Vuoteen 1998
mennessä kututuksen ennustetaan kasvavan 0,26 milj. tonniin eli vuotuinen kasvu-
vauhti on peräti 27 %. Myös digitaalisten tulostusmenetelmien käytön ennustetaan
kasvavan.

3. TUOTEANALYYSI

3.1 Yleistä

Tuoteanalyysin tarkoituksena on selvittää, mitkä paperista mitattavat ominaisuudet (tilasuureet) ovat lopputuotteen käyttökelpoisuuden kannalta tärkeitä /4/. Tässä esitettävä tuoteanalyysi on tehty Kymin Paperiteollisuus Oy:n PK 9:llä valmistettavan korkealuokkaisen puuvapaan pintaliimatun kopiopaperin vaatimusten mukaan. PK 9:llä valmistetaan myös offset- ja kirjekuoripaperia, joiden erityisvaatimuksia on myös lyhyesti selvitetty.

3.2 Kopio- ja laserpaperi

Tässä diplomityössä kopiopaperilla tarkoitetaan arkitettua kopiointiin tai lasertulostukseen käytettävää paperia. Kopiopaperin toiminnalliset vaatimukset voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- ajettavuus kopiokoneella ja lasertulostimella
- paperin kopioitavuus/tulostettavuus eli kopio- ja laserjäljen laatu
- kopioidun/tulostetun paperin käyttökelpoisuus eli loppukäyttäjän paperille asettamat vaatimukset

Seuraavassa esitetään kopio- ja laserpaperin tuoteanalyysi /5,6,7,7,8/.

3.2.1 Dimensiostabiliteetti ja kuumennuksen kestävyys

Kopiopaperin tärkein ominaisuus on **dimensiostabiliteetti** eli mittapysyvyys. Dimensiostabiliteetillä tarkoitetaan laajasti kaikkia paperissa tapahtuvia mittamuutoksia. Tarkennettuna dimensiostabiliteetin voidaan ajatella pitävän sisällään mm. kuivauskutistuman, kosteuslaajeneman, käyristymisen ja kupruilun. Luvussa 4.2.2 ja 4.2.3 käsitellään näistä käyristymistä ja kupruilua tarkemmin.

Kopiopaperi ei saa muuttaa tasonsuuntaisia mittojaan, kun se kulkee kuumien telojen läpi tulostuslaitteessa (**kuivauskutistuma**). Toisaalta, jos kysymyksessä on ink-jet -tulostus, ei kosteuspitoisuuden kasvukaan saa aiheuttaa dimensioiden muutoksia

(**kosteuslaajenema**). Myöskään ympäröivän ilman kosteusmuutoksetkaan eivät saa vaikuttaa paperin mittoihin.

Mittamuutosten erilaisuus paperin pinta- ja taustakerroksen välillä aiheuttaa paperin käyristymisen. Paperin kulkiessa kuumennusnippin läpi saattaa lämpö laukaista paperissa ns. **kuumennuskäyristymisen**. Kuumennuksen lisäksi käyristymistä aiheuttaa ilman suhteellisen kosteuden muutokset ns. **kosteuskäyristyminen**. Näiden lisäksi paperin alkuperäinen ns. **riisikäyryys** voi olla merkittävä käyristymisen aiheuttaja. Paperin käyristyminen aiheuttaa tukoksia ja syöttöhäiriöitä kopiokoneessa ja tulostuslaitteessa, pienentää bin-kapasiteettia (arkkien lukumäärä, joka mahtuu 250 arkin lokerikoon), vaikeuttaa kaksipuoleista kopiointia ja tulostuksen/kopioinnin jälkeistä käsittelyä. Käyristymisen aiheuttamat ongelmat ilmenevät varsinkin kaksipuoleisessa tulostuksessa /10/.

Kopiopaperin **aaltomaisuus ja kupruilu** pienentävät bin-kapasiteettia, huonontavat paperiarkin tai -pinon ulkonäköä ja pahimmassa tapauksessa estävät paperia saavuttamasta kaikkialla kontaktia kopiorumpuun, jolloin paperiin jää kopioitumattomia alueita ja kirjaimia (deletion). Ongelma korostuu kaksipuoleisessa kopioinnissa ja lasertulostuksessa. Deletion johtuu siitä, että paperin pinta muuttuu ensimmäisen kopioinnin aikana aaltomaiseksi tai kupruiseksi. Toisen puolen kopioinnin yhteydessä pinta ei saa kosketusta fotojohteeseen ja jää kopioitumattomia alueita.

Kuumennettaessa paperia siitä ei saa **haihtua haisevia tai tahmeita höyryjä**. Hajua paperiin saattaa aiheuttaa pilaantuneen tärkkelyksen käyttö pintaliimana. Hajua ongelmallisempia ovat haihtuvat tahmeat höyryt, jotka tiivistyvät kopiokoneen kylmiin teloihin ja keräävät pölyä. Tämä aiheuttaa tulostusjäljen laadun heikkenemistä ja tukoksia. Paperi ei saa myöskään **tarttua kiinni kuumennustelaan**, joten käytettävän sideaineen tulee olla kuumennuksen kestävä.

3.2.2 Pintaominaisuudet

Paperin **pintaorientaatio ja sen toispuoleisuus** ovat merkittäviä syöttöhäiriöiden aiheuttajia, koska niillä on taipumus käyristää paperia. Paperin toispuoleisuuden aiheuttama käyryys voi näkyä liian suurena alkuperäisenä käyrytenä, ilmastoimisen johdosta syntyneenä tai kuumennuksen aiheuttamana käyrytenä.

Paperin kulku kitkasyöttöisissä laitteissa perustuu kitkaan, jolloin paperin oikea **kitkakerroin** on tärkeä ominaisuus. Paperin kitkakertoimen tulee olla oikea suhteessa paperiin, metalliin ja kumiin. Liian alhainen kitkakerroin aiheuttaa syöttöhäiriöitä ja tukoksia koneen sisällä, koska paperi tulee liukkaaksi eivätkä syöttölaitteiden kumipyörät saa otetta paperista. Liian korkea kitkakerroin puolestaan lisää kaksoissyöttöjä /11/ ja saattaa naarmuttaa fotojohdetta. Kitkakerroin vaikuttaa myös arkipinojen käsiteltävyyteen ulostulopuolen lokerikossa ja jatkokäsittelyssä. Erityisen tärkeää on, että kitkakerroin pysyy vakiona arkista toiseen, vaikka riisiin leikataan arkkeja eri rullista. Liikekitkakerroin mitattuna ASTM D1894-menetelmällä tulisi Lynen /12/ mukaan olla välillä 0,4 - 0,7 ja vaihdella riisin sisällä vähemmän kuin 0,1 yksikköä. IBM suosittelee lepokitkakertoimeksi 0,35 - 0,62 (kirjoittimelle IBM 3825) /10/.

Kopiopaperin **sileys** on tärkeä ominaisuus, koska sileillä papereilla toneri leviää tasaisemmin paperin pinnalle ja parantaa näinollen kopio- ja laserjäljen tulostusjälkeä. Sileydellä on kuitenkin optimi, sillä liian sileä paperin pinta synnyttää staattista sähköä, aiheuttaa käsittelyongelmia (tukokset, syöttöhäiriöt, arkipintojen toisiinsa tarttuminen jne.) ja tekee paperista liukkaan kitkakertoimen pienentyessä. Liian karhea paperi voi puolestaan naarmuttaa fotojohdetta.

3.2.3 Sähköiset ominaisuudet

Paperin **permittiivisyys** (dielektrisyysvakio) kuvaa, miten helposti paperi muuttuu sähkökentässä dielektriseksi (pooliseksi). Tämä vaikuttaa värinsiirtoon eli siihen kuinka paljon väriä siirtyy paperille (tonerin tummuus paperin pinnalla). Toisin sanoen värinsiirto määrää suureksi osaksi sen densiteettitason, jolle päästään kopioinnissa tai lasertulostuksessa.

Paperin ja erityisesti sen pinnan **sähkönjohtokyky** (eli konduktanssi) riippuu paperin kosteus- ja suolapitoisuudesta /11/. Sähköinen varautuminen ulostulopuolella johtuu puolestaan pääosin paperin kuivumisesta, jolloin paperin pinta- ja tilavuusresistiivisyys kasvavat voimakkaasti. Liian resistiivisillä papereilla on taipumusta synnyttää staattista sähköä, joka aiheuttaa paperin ajettavuushäiriöitä (mm. kaksoissyöttöjä, paperin kiinnitarttumista teloihin ja toisiinsa sekä tukkeumia). Se voi aiheuttaa myös laatuongelmia, johtuen värijauheen huonosta kiinnipysymisestä, siirto-ongelmista ja/tai tahrimesta. Staattinen sähkö vaikeuttaa käsittelyä tulostuksen jälkeen sekä lisää pölyn irtoamista. Toisaalta liian hyvin sähköä johtavissa paperissa saattavat varaukset kulkeutua pois

paperin pinnalta ennenkuin värijauhe on täydellisesti siirtynyt paperille, jolloin tulostusjäljen densiteetti saattaa huonontua. Tämä on erityisen tärkeää, kun pyritään tummempaan tulostusjälkeen ja parempaan resoluutioon (etenkin lasertulostuksessa) /12,13/. Paperin sähkönjohtokykyä mitataan pintaresistiivisyydellä, jonka suositusarvo kopiopaperille DIN-standardissa 19309 /13/ on 10^8 - 10^{11} ohmia.

3.2.4 Optiset ominaisuudet

Paperin **opasiteetti** on tärkeä ominaisuus, koska kopiointi tai tulostus tehdään nykyään usein paperin molemmille puolille, jolloin läpinäkyvyyttä ei saa esiintyä. Kopio- ja tulostuspaperin **vaaleus** vaikuttaa painojälkien tummuuteen, koska densiteettimittaus tehdään tavallisesti suhteessa paperin vaaleuteen. Paperin vaaleus, kuten myös **sävy**, vaikuttavat toistettavien värien kirkkauteen ja värisävyihin sekä vaaleiden värisävyjen erottumiseen. Paperin väri vaikuttaa myös täyspeitteisillä pinnoilla, koska värit ovat läpikuultavia.

3.2.5 Muut ominaisuudet

Huokoisuuden paikalliset vaihtelut aiheuttavat absorptiovaihteluita ja siten epätasaista densiteettiä (laikullisuutta). Paperin huokosrakenteen tulee olla sellainen, ettei läpipainatusta eikä painoväriin kulkeutumista tasonsuunnassa pääse syntymään (ei koske kuivatoneri tulostusta) /14/. Huokoisuus vaikuttaa myös vakuumilla toimivien syöttö- ja kuljetuslaitteiden toimintaan /11/. Liian suurella paperin huokoisuudella on taipumusta lisätä kaksoissyöttöjen määrää.

Kopiopaperin oikea **jäykkyys** on tärkeä ominaisuus hyvälle arkin syötölle ja kulkemiselle kopiokoneessa ja lasertulostimessa, koska liian velto arkki taipuu ja aiheuttaa tukkeuman. Liian jämäkkä arkki ei puolestaan taivu riittävästi ohjaimissa ja aiheuttaa myös tukkeuman /11/. Liian jämäkkä arkki saattaa aiheuttaa myös paperin ja fotojohteen välille riittämättömän kontaktin ja huonontaa siten tulostusjälkeä. Myös valmiin paperituotteen käsiteltävyys loppukäyttäjillä ns. **ryhdikkyys** asettaa jäykkyydelle minimitason. Lyne /12/ on arvioinut kopiopaperin jäykkyyden alarajaksi konesuunnassa 0,10 mNm (ISO/DP 5629) ja poikkisuunnassa 0,07mNm. Standardin DIN 19309 /13/ mukaan jäykkyyden alaraja on 0,13 mNm. Jäykkyyden yläraja riippuu enimmäkseen paperin kulkureitin kiemuraisuudesta tulostuslaitteessa. Paperin muista ominaisuuksista

eniten jähkkyteen vaikuttavat paperin paksuus, neliömassa ja kosteus. Jähkkyydellä on myös suora yhteys paperin käyristymiseen.

Paperin **pölyämisellä** tarkoitetaan paperin pinnasta irtoavaa kuitu- ja täyteainepölyä sekä arkkien pinnalla olevaa irtonaista leikkauksessa syntynyttä leikkuupölyä. Paperin pölyäminen likaa kopiokonetta ja saattaa aiheuttaa kitkasyöttölaitteen syöttöhäiriöitä. Tästä on seurauksena lisääntyvä huollon tarve ja koneen käyttökustannusten nousu. Ennen kuin pölyämisestä kehittyy ajettavuusongelmia, niin se vaikuttaa kopio- ja tulostusjäljen laatuun alentaen yksityiskohtien toistokykyä.

Pölyämisen estämiseksi kopiopaperi sekä massa- että pintaliimataan. **Liimauksen** tarkoituksena on hydrofoboida paperi ja sitoa kuidut ja täyteainepartikkelit paremmin paperiin. Kopio- ja laserpaperin liimausasteen mittaamiseen ei ole olemassa mittaustekniikkaa /9/. Pintaliimauksen tehoa mitataan kuitenkin usein Cobb -vesiabsorptio mittauksella.

Paperin **karheus** vaikuttaa toonerin tummuuteen paperin pinnalla. Hyvin karheilla paperilla tooneri ei riitä peittämään paperin pinnan epätasaisuuksia, jolloin tumman pinnan densiteetti laskee.

Paperin **paksuus** vaikuttaa paperin lämpiämisen kautta värin kiinnittymiseen (sulamiseen) paperiin. Paksuuden paikalliset vaihtelut heijastuvat painojäljen laikullisuuteen. Lisäksi paksuus vaikuttaa käyryyteen.

Paperin **pintaenergian** tulee olla oikealla tasolla, sillä se vaikuttaa värijauheen kiinnittymiseen ja nimenomaan jäähtyneen toonerin kiinnipysymiseen paperissa. Pintaenergian tulee olla riittävän korkea, ettei tooneri irtoa paperista hankaamalla. Ominaisuutta kutsutaan tooneriadheesioksi.

Paperin epähomogenisuutta luonnehditaan tavallisesti sen **formaatiolla**, jolla tarkoitetaan pienimittaista neliömassahajontaa. Paperin formaation tasaisuutta pidetään erittäin tärkeänä, koska sen tiedetään kokemukseräisesti vaikuttavan melkein kaikkiin paperin kannalta tärkeisiin tilasuureisiin ja käyttöominaisuuksiin /15/. Hyvä formaatio on ensisijaisen tärkeä edellytys mm. tasaisen tulostusjäljen saavuttamiseksi.

Paperin oikea **kosteuspitoisuus** on tärkeää, koska sillä säädetään paperin muita ominaisuuksia mm. sähkönjohtokykyä, käyristymistä ja jähkkyyttä /11/. Riittävä kosteus

on tarpeellinen, jotta paperi olisi johtavaa, eikä staattisen sähkön aiheuttamia ongelmia syntyisi. Liian korkea kosteuspitoisuus voi kuitenkin aiheuttaa paperin käyristymistä ja kopiojäljen densiteetin alenemista. Alhainen kosteuspitoisuus on edullisin, koska tällöin paperin kuivuminen ei aiheuta yhtä suuria dimensiomuutoksia. Paperin kosteus saattaa alentua jopa 3 % -yksikköä kopioitaessa kaksipuoleisesti. Sopiviksi arvoiksi kopiopaperin kosteudelle on kirjallisuudessa esitetty 3,4 - 5,5 % /16/, 3,7 - 5,3 % /13/ ja 4,2 - 5,3 % /12/.

Säilytys- ja arkistointikelpoisuutta voidaan pitää myös kopio- ja tulostuspaperille tärkeänä ominaisuutena. Laadun tasaisuus rullasta toiseen on myös tärkeää, koska riisin arkit leikataan useasta rullasta. Taulukkoon 2 on kerätty edellä esitetyn perusteella yhteenveto kopiopaperin tärkeistä ominaisuuksista.

Taulukko 2. Kopiopaperin tuoteanalyysin yhteenveto.

Paperista mitattava ominaisuus	Paperin toiminnallinen ominaisuus		
	Ajettavuus	Kopioitavuus	Loppukäyttäjän vaatimukset
Dimensiostabiliteetti			
- käyristyminen	xxx		xx
- kupruilu	xx	xx	xx
Pintaorientaatio	xxx		
Lämmön johtavuus	x	xxx	
Formaatio	x	xx	
Huokoisuus	x	xx	
Kosteus	xxx	x	
Kitkakerroin	xx		x
Sileys	xx	xx	
Karheus		xxx	
Jäykkyys / ryhti	xxx	xx	x
Pölyäminen	x	xx	
Liimaus	x	xx	
Paksuus	x	xxx	
Neliömassa	x	x	x
Permittiivisyys		xxx	
Sähkön johtokyky	xxx	xx	
Pintaenergia		xx	
Opasiteetti		xx	
Vaaleus		xx	xx
Väri		xx	

xxx voimakas vaikutus
xx melko voimakas vaikutus
x heikko vaikutus

3.3 Ink jet- tulostuspaperi

Mustesuihkupaperilta vaadittavat ominaisuudet riippuvat ratkaisevasti siitä, millaista väriä (vesi- vai liuos pohjaisia) mustesuihkulaitteessa käytetään, ja onko kyseessä mustavalko- vai väritulostus. Tässä yhteydessä ei ole tarkoituksena selvittää eilaisten mustesuihkumenetelmien asettamia vaatimuksia paperille, koska se edellyttäisi menetelmien selvitystä, vaan esitellään yleisesti mustesuihkumenetelmän erityispiirteet.

Mustavalkotulostuksessa käytettävien liuotinpohjaisten värien kuivuminen perustuu pääasiassa haihtumiseen, ei imeytymiseen. Väritulostuksessa liuottimen haihtuminen ei riitä, vaan paperilta vaaditaan lisäksi sopivan suurta pinnan **absorptiokykyä** z-suunnassa ja pientä xy-suuntaista absorptiota. /1/

Paperin absorptiokyvyssä voidaan erottaa kolme eri ominaisuutta /1/:

- *Absorptionopeus* eli pisaroiden kuivumisnopeus, jonka tulee olla väritulostuksessa muutama millisekunti. Mustavalkotulostuksessa riittää pidempi kuivumisnopeus.
- *Absorptiokapasiteetti*. Väritulostuksen neljä väriä vaativat absorptionopeuden lisäksi riittävää kapasiteettia, jotta pinta kuivuisi. Mustavalkotulostus ei ole yhtä vaativa absorptiokapasiteetin suhteen.
- *Absorption suunta*
 - Z-suuntainen absorptio ei saa olla liian suuri, ettei väri imeydy paperiin liiaksi ja aiheuta pisteiden tummuuden laskua ja läpipainatusta.
 - Pisarat eivät saa levitä xy-suunnassa liian paljon, ettei erotuskyky huonone.
 - Epäsymmetrinen, tähtimäinen leviäminen huonontaa myös erotuskykyä (terävyyttä).

Mustesuihkupaperin vaatimia erityisominaisuuksia voidaan sanoa olevan oikeanlainen absorptiokyky, joka riippuu yleensä paperin pinnan **huokosrakenteesta** ja **pintaenergiasta**. Myös pinnan **pH** on erityisominaisuus, joka etenkin vesipohjaisilla väreillä vaikuttaa merkittävästi väripisaroiden värisävyyn. /1/

Paperin huono **sileys** ja suuri **karheus** vaikuttaa mustepisaroiden leviämisen johdosta pisteiden erotuskykyyn. Hyvä **vaaleus** puolestaan parantaa tulostusjäljen laatua lisäämällä toistettavien värisävyjen määrää ja hyvä **opasiteetti** vähentää läpipainatusta.

Paperin **pölyämättömyys** on tärkeä ominaisuus mustesuihkupatruunan suuttimen tukautumisen /1/ ja tulostuslaitteen muiden osien pölyyntymisen kannalta /14/.

Yhteenvedona voidaan todeta, että suurimmat mustesuihkupapereiden ongelmat liittyvät tulostettavuuteen eli mustesuihkujäljen laatuun ja erityisesti paperin absorptiokykyyn. Ajettavuus ei ole ongelma varsin hitaassa ja kosketuksettomassa mustesuihkumenetelmässä.

3.4 Offset- ja kirjekuoripaperi

Offsetpaperin tärkeät ominaisuudet ovat hyvin pitkälle samat kuin edellä on esitetty kopiopaperille. Luetteloon voidaan lisätä **z-suuntainen lujuus**, joka vaikuttaa paperin palstautumiseen. Korostetusti voidaan ottaa esille offsetpainatuksen kannalta **pintalujuus**, **pölyämättömyys** ja **dimensiostabiliteetti**, jotka moniväripainatuksessa ovat värien kohdistettavuuden kannalta tärkeitä. Rainapainatuksessa korostuvat lisäksi **veto-** ja **repäisylujuuksien** tärkeys verrattuna arkkipainatukseen. Isojen arkkien olessa kysymyksessä tulee **jäykkyyden** merkitys kasvamaan /14/.

Kirjekuoripaperille pätevät pitkälle samat perusominaisuudet kuin kopiopaperille, mutta tiettyihin ominaisuuksiin on kiinnitettävä erityistä huomiota /5/. Kirjekuoripaperin **formaatio** ja **opasiteetti** ovat erityisen tärkeitä ominaisuuksia, koska kirjekuoren sisäpuolen harmaa "vuoripainatus" ei saa kuultaa läpi /14/. Pieni **huokoisuus** on tärkeää, jottei vuoripainatuksen väri kulkeudu läpi. **Liimausaste** ja **dimensiostabiliteetti** ovat myös tärkeitä, varsinkin kun valmistetaan ikkunallisia kirjekuoria. Myös **stanssattavuus** asettaa rajoituksia kuluttavien pigmenttien käyttöön /14/. Lisäksi **kitkakerroin**, **tasaisuus** ja **paksuus** ovat Recherin /5/ mielestä tärkeitä ominaisuuksia. Kuoppamäki /17/ lisää listaan vielä **puhkaisulujuuden** ja **paksuuden**.

4. KOPIOPAPERIN TÄRKEIMMÄT LAATUOMINAISUUDET JA NIIHIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

4.1 Dimensiostabiliteetti eli mittapysyvyys

4.1.1 Yleistä

Paperin kosteuskäyttäytyminen ei ole ainoastaan riippuvainen kuidun komponenttiai-
neiden (selluloosan, hemiselluloosan ja ligniinin) kosteuskäyttäytymisestä, vaan myös
paperin rakenteellisilla tekijöillä on merkittävä vaikutus /18/. Ruthlandin /19/ mielestä
paperin rakennetekijät ovatkin dimensiostabiliteetin kannalta tärkeämpiä kuin massa-
koostumuksen kosteuskäyttäytyminen.

Dimensiostabiliteetti voidaan jakaa laajasti tarkasteltuna tasonsuuntaisiin (x- ja y-suun-
taisiin) ja tasosta poispäin (z-suuntaisiin) suuntautuviin mittamuutoksiin /19,20/. Tyy-
pillisiä tasonsuuntaisia mittamuutoksia ovat kuivauskutistuma ja kosteuslaajenema.
Tasosta poispäin suuntautuvia mittamuutoksia ovat mm. käyristyminen (curl), kurt-
tuuntuminen (wrinkle), kupruilu (cockle) ja epätasaiset reunat (grainy edge) /20/.

Watanaben, Sawan ja Aben /21/ tutkimuksessa on todettu, että dimensiostabiliteetin
muutokset lisääntyvät freeneksen pienentyessä. Tämä johtuu lisääntyneestä sitoutumis-
kykyisestä pinta-alasta, mikä puolestaan lisää muodonmuutosta verkostossa. Myös kui-
tuorientaation lisääntyminen konesuunnassa (MD) heikentää dimensiostabiliteettia
poikkisuunnassa (CD). Samassa tutkimuksessa on myös todettu, että mitä suuremman
jännityksen alaisena paperi on kuivattu, sitä parempi on sen dimensiostabiliteetti.
Myös neliöpainon nostaminen ja märkäpuristuksen lisääminen parantavat paperin di-
mensiostabiliteettia /21/.

4.1.2 Kosteuslaajenema ja kuivauskutistuma

Tasonsuuntaisiin (MD ja CD) mittamuutoksiin vaikuttavat kuituorientaatio, kuivatus ja
jauhatuksen määrä /19/. Jauhatuksen vaikutuksesta kuitu turpoaa, siitä tulee joustava ja
muodostuu hienoainetta. Lisääntynyt turpoaminen lisää paperin kuivauskutistumaa sitä
kuivattaessa /19/. Jauhatuksen vaikutus paperin kosteuslaajenemaan ja kuivauskutistu-
maan ei ole kuitenkaan yksiselitteinen, koska jauhatuksella on todettu myös vastak-
kaissuuntaisia vaikutuksia dimensiostabiliteettiin. Sitoutumiskykyisen hienoaineen

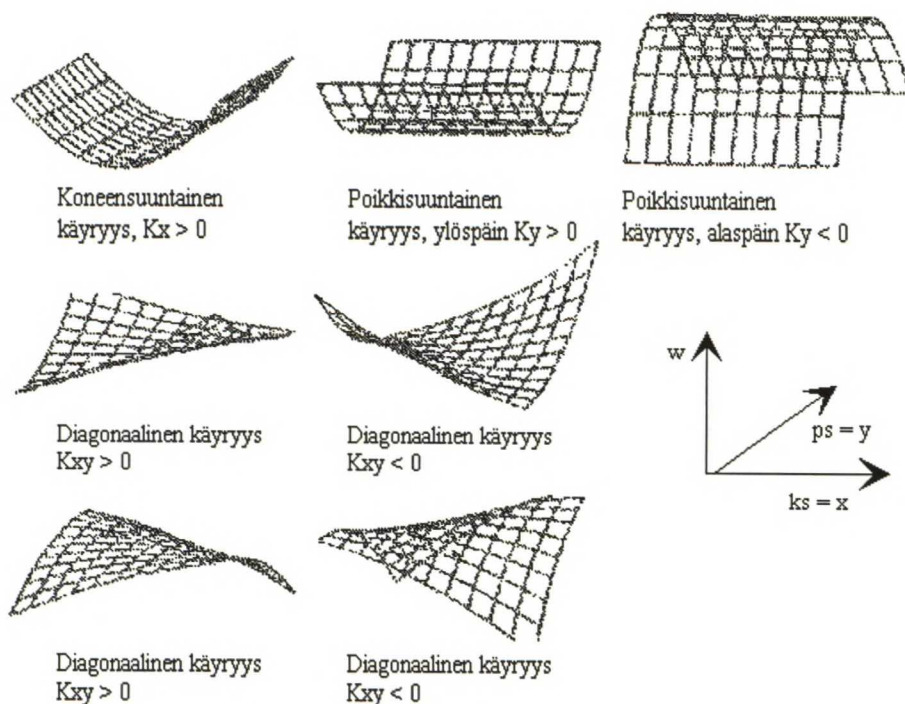
lisääntyminen jauhatuksessa vähentää dimensiostabiliteettia, mutta toisaalta kuitujen kiharaisuuden oikeneminen jauhatuksen alussa lisää sitä /19/. Tämän perusteella voidaan todeta dimensiostabiliteetin paranevan lievästi jauhatuksen alussa.

Paperin kosteuskäyttäytymiseen vaikuttaa suuresti myös, onko paperi kuivunut jännityksenalaisena vai vapaasti. Jännityksen alaisena kuivuneen paperin kosteusmuodonmuutos on tunnoton puristuspaineen muutoksille puristinosalla (\Rightarrow tiheyden vaihtelulle) niin kone- kuin poikkisuunnassa /20/. Vapaasti kuivuneen paperin poikkisuuntainen kosteuslaajeneminen kasvaa voimakkaasti puristuspaineen, ts. tiheyden, kasvaessa /19,20/. Tiheysvaihteluun radan poikkisuunnassa vaikuttaa viivapaineen vaihtelut, mikä johtuu telan vääränlaisesta bompeerauksesta.

4.1.3 Käyristyminen

Paperin käyryys on paperin muodon poikkeamista tasosta. Käyristyminen johtuu siitä, että paperin mitat muuttuvat eri tavalla ylä- ja alapinnoilla kosteuden funktiona. Tämä johtuu kuituorientaation voimakkuuden, orientaatiokulman ja hieno- ja täyteainejakauksen toispuoleisuudesta, mutta myös vedenpidätyskyvyn ja paperin lämpiämisen toispuoleisuudesta. Puristimella syntyvällä epätasaisella tiheysjakaumalla paksuussuunnassa on myös merkittävä vaikutus käyristymiseen /20/. Venytys voi aiheuttaa käyristymistä, jos se aiheuttaa plastista muodonmuutosta /22/. Lebellin ja Stradalin artikkelissa /23/ on raportoitu myös jauhatuksen määrän nostamisen lisäävän käyristymistä. Kuivatusosan ajotapaa (höyrysuhde, vac-telojen imutasot, loppukosteus jne.) pidetään käyristymiskäyttäytymisen kannalta ratkaisevana, ja sitä käytetäänkin usein käyristymisen hallintakeinona /24/.

Käyryyden luonnehtimiseen tarvitaan kolme komponenttia: suuruus, käyristymissuunta (kone-, poikkisuuntainen ja diagonaalinen käyryys) sekä käyristymispuoli. Kuvassa 1 on esitetty käyristymissuunta ja -puoli.



Kuva 1. Käyristymissuunta ja -puoli /22/.

Käyryyden suuruutta ilmoitettaessa käytetään yksikköä $[K] = 1/m$, joka on kaarevuus-säteen käänteisarvo. Alaindeksejä käytetään täsmentämään käyryyden suuntaa. Positiiviset K_x :n ja K_y :n merkit tarkoittavat paperin yläpintaa (yläviirapuolta) kohti ja negatiiviset alapintaa (alaviirapuolta) kohti käyristynyttä näytettä. Diagonaalisesti käyrän arkin vierekkäiset nurkat ovat eri korkeudella arkin keskustaan verrattuna. Diagonaalisen käyryyden etumerkki tarkoittaa paperin kiertymissuuntaa, joka tulevassa ISO-standardissa määriteltäneen sen mukaan, missä suunnassa konesuunta on käyryysakselista /22/.

Kuitujen kosteuslaajenema on tunnetusti poikkisuunnassa 10-kertainen verrattuna pituussuuntaan. Jos paperin viirapuolella on voimakkaampi orientaatio, niin paperin kuituessa viirapuoli kutistuu poikkisuunnassa enemmän ja konesuunnassa vähemmän kuin yläpuoli, ja paperi käyristyy viirapuolta kohti. Kuituorientaation voimakkuuden kasvattaminen heikentää siis paperin mittapysyvyyttä /24/. Kuituorientaatiokulman toispuoleisuus aiheuttaa puolestaan diagonaalista käyristymistä. Sitoutuneisuuden toispuoleisuuden aiheuttama käyristymä on samansuuntaista sekä kone- että poikkisuunnassa ja paperista tulee kuppimainen /25/.

Kopiokoneessa tai lasertulostimessa paperi kulkee kuuman 150-200 °C kiinnitys nipin läpi, jolloin paperi kuivuu enemmän kuumemman telan puolelta ja käyristyy. Kopiopaperin käyristymisessä havaitaan usein säännöllinen paraabelin kaltainen K_y -profiili, johon vaikuttavat kuivatuskutistuma ja kuivumisnopeus. A4-arkin käyristyminen näkyy usein vain arkin reunoilla, koska alhaisen jäykkyyden takia arkin oma paino oikaisee sen muualla.

4.1.4 Kupruilu

Kupruilulla tarkoitetaan tilannetta, jossa paperi on menettänyt tasomaisuutensa pienten, 5 - 50 mm kokoisten satunnaisesti sijoittuneiden alueiden taivuttua ulos paperin tasosta. Kupruilua esiintyy tavallisesti kosteuden muuttuessa paperin valmistuksessa, jalostuksessa ja loppukäytössä. Kupruilu johtuu paperin eri ominaisuuksien paikallisista eroista paperin eri puolilla. Näitä ovat mm. dimensiostabiliteetin ja kuituorientaation toispuolisuus ja niiden paikalliset vaihtelut. Kupruilua esiintyy eniten keveillä ja keskiraskailla paperilajeilla. Pintapainon kasvaessa jäykkyyden kasvaminen vähentää kupruilua /1/. Kupruilun on todettu esiintyvän yleensä voimakkaampana radan reunoilla /1/.

Eräs syy kupruiluun on paperin käyristyminen kosteuden muutoksissa /25/. Mikäli paperin toispuolisuus on paikallista, niin silloin paperi käyristyy kyseisestä kohdasta paikallisesti. Useissa eri kohdissa tapahtuvat satunnaisen suuntaiset paikalliset käyristymiset voivat siten aiheuttaa kupruilua.

Myös arkin sisäisellä orientaatiovaihtelulla on yhteys kopiopaperin kupruiluun /24/. Kuituorientaatiokulman toispuoleisuus voi aiheuttaa paperiin niin suuria vääntövoimia, että syntyy kupruilua. Yhdessä kohdassa esiintyvä toispuolisuus aiheuttaa arkkiin diagonaalisen käyristymisen. Jos arkissa esiintyy useassa kohdassa satunnaisen suuntaista toispuolisuutta, niin käyristyminen tasoittuu ja paperi kupruilee.

Sekä orientaatiokulman että orientaation voimakkuuden toispuolisuuden paikallinen vaihtelu aiheuttavat kupruilua. Näiden molempien vaikuttaessa yhdessä kupruilun voimakkuus kasvaa. Yhteenvedona voidaan sanoa, että orientaation voimakkuuden toispuolisuus vaikuttaa eniten kuprujen muotoon ja orientaatiokulman toispuolisuus kupruilun voimakkuuteen. /25/

Paperin epähomogeenisuutta luonnehditaan usein formaatiolla, minkä takia formaation pitäisi vaikuttaa myös kupruiluun. Huono formaatio ei kuitenkaan sellaisenaan pysty aiheuttamaan kupruilua, koska ilman toispuolisuutta tai ilman paikallista kutistuman vaihtelua ei paperiin synny taivuttavia voimia. Korrelaatiot formaation ja kupruilun välillä johtunevat ilmeisesti siitä, että formaation huonous kertoo samalla myös paperin rakenteen muusta epätasaisuudesta /25/.

4.2 Formaatio

Formaatiolla tarkoitetaan paperin pienimittakaavaista neliömassavaihtelua, jonka aallonpituus on pienempi kuin 100 mm. Pienimittakaavaisen neliömassavaihtelun suuruutta kutsutaan formaation tasaisuudeksi /15/. Paperin pohjalla tarkoitetaan visuaalista vaikutelmaa, joka saadaan tarkasteltaessa paperia valoa vasten.

Periaatteessa pienimittakaavainen neliömassavaihtelu paperissa johtuu kuitujen flokkaantumistaipumuksesta kuitulietteessä sekä suotautumistapahtuman satunnaisesta luonteesta /15/. Taulukossa 3 on esitetty eri tekijöiden vaikutuksia kuidun flokkaantumisen taipumukseen.

Taulukko 3. Eri tekijöiden vaikutus sulfaattimassan flokkaantumiseen /26,27/.

	Tekijän suuruus	Flokkisuusmuutos, %
Kuitususpension sakeus	0,5 % -> 0,6 % 0,5 % -> 0,4 %	+19 -18
Kuitususpension lämpötila ja pH		Ei vaikutusta
Kuitususpension virtausnopeus	0,3 m/s -> 0,6 m/s 0,3 m/s -> 0,15 m/s	-14 +14
Kuidunpituus (valkaisu- mätty sa)	2,4 mm -> 1,30 mm	-51
Kuidun hemiselluloosapitoisuus kasvaa		Lievästi positiivinen
Koivun osuus kasvaa	100 % mänty -> 100 % koivu	-35
Jauhatus		Selitettävissä taipuisuuden ja kuidunpituuden avulla
Retentionaaineet	annostus 0,02 ... 0,025 %	alle +5
Deflokkauskemikaalit:	anioninen PAM, annostelu 0,5 % kasviliima, annostelu 0,5 % kasviliima, annostelu 1,5 %	-22 -17 -29

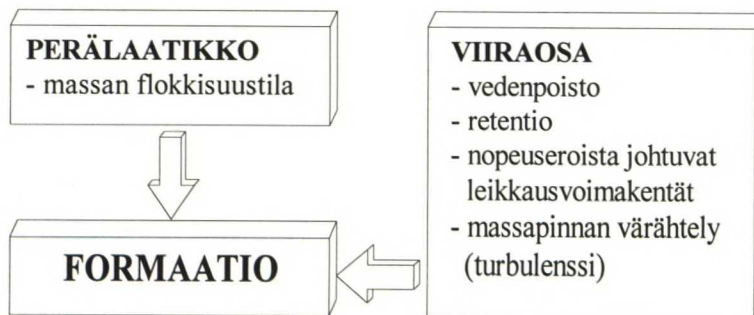
Merkittävä tekijä käsiteltäessä formaatiota on massaseoksessa käytetyt kuitutyypit. Suurella määrällä hienoja ja lyhyitä kuituja (lehtipuut) on helppo saada formaatioltaan

hyvää paperia. Kuitujen pituudella ja pituusmassalla onkin todettu selvä vaikutus massan formaatiopotentiaaliin /28,29/. Massan formaatiopotentiaalin kanssa korreloi yksinkertainen tunnusluku, joka kertoo kuinka monta kuitua tarvitaan muodostamaan tietyn neliömassan omaava paperi /30/. Tunnuslukua yksinkertaistamalla päädytään yksittäisen kuidun massa, joka voidaan laskea kuidun keskipituuden ja pituusmassan avulla seuraavasti /28/:

$$m_{\text{kuitu}} = L\omega \quad (1)$$

missä	m_{kuitu}	on	kuidun massa, g
	L		pituuspainotettu kuidunpituus, m
	ω		kuitujen pituusmassa, g/m

Edellä esitetty massan formaatiopotentiaali määrää formaatiolle perustason, johon kyseisellä massaseoksella voidaan päästä. Varsinaiseen paperin formaatioon vaikuttaa ratkaisevasti perälaatikossa vallitsevat olosuhteet ja viiraosan vedenpoisto. Perälaatikon olosuhteista tärkeimmät ovat massa kohdistuvan turbulenssin voimakkuus ja aallonpituus, jotka vaikuttavat viiralle iskeytyvän massan flokkisuustilaan. Myös perälaatikon sakeus on formaation kannalta keskeinen muuttuja. Kuvassa 2 on esitetty formaatioon vaikuttavat tekijät rainanmuodostuksessa.



Kuva 2. Formaatioon vaikuttavat tekijät rainanmuodostuksessa /28/.

Kanadalaiset Kerekes ja Dodson ovat kehittäneet tunnusluvun, joka korreloi hyvin perälaatikkomassan flokkaantumistaipumuksen kanssa. Lisäksi sen on todettu korreloivan myös paperin formaation kanssa, silloin kun paperi on valmistettu samalla koneella /31/. Miehitysluku (engl. crowding factor) kertoo, kuinka monta kuitua on sellaisen pallon sisällä, jonka halkaisija on keskimääräinen kuidunpituus /32/. Kaavassa 2 on esitetty miehitysluku N /32/.

$$N = \frac{5C_m L^2}{\omega} \quad (2)$$

missä	N	on	miehitysluku
	C_m		massan sakeus, %
	L		kuidun keskipituus, m
	ω		pituusmassa, kg/m

Miehitysluvusta voidaan todeta, että mitä pienempi se on perälaatikossa, sitä parempi on paperin formaatio ja sitä suurempi on massan formaatiopotentiaalin suhteellinen osuus paperin formaatiosta. Miehityslunun kasvaessa korostuu rainanmuodostusprosessin toiminta. Tällöin mm. kemialliset tekijät ja nopeuseroista johtuvat leikkausvoimat tulevat tärkeämmiksi formaation kannalta. Tyypillinen miehitysluku hienopaperille on 27, kun se esim. taivekartongille on 16 ja lainerille 32. /28/

Käytännön paperinvalmistuksessa voidaan massan formaatiopotentiaaliin vaikuttaa jauhatuksella. Jauhatuksessa kuidut katkeilevat, mutta pituusmassa ei juurikaan muutu /33/. Pituusmassaan voidaan lähinnä vaikuttaa raaka-ainevalinnalla /28/. Käytännössä jauhatus ei kuitenkaan paranna formaatiota, koska jauhatusasteen kasvaessa massan suotautumisvastus kasvaa, ja siitä johtuen voidaan joutua käyttämään korkeampaa perälaatikkosakeutta, joka puolestaan heikentää formaatiota. Jos jauhatuksella kuitenkin halutaan vaikuttaa formaatioon, tulee jauhatustapa valita mahdollisimman katkovaksi /28/. Mansonin /29/ mukaan voidaan männyn jauhatukseen lisätä jauhatusenergiaa hieman yli tarpeen ja näin parantaa paperin formaatiota heikentämättä kuitenkaan muita, lähinnä lujuusominaisuuksia.

4.3 Huokoisuus

Paperi on monimutkainen huokoinen materiaali johtuen paperin sisältämien materiaali-partikkelien epämääräisistä dimensioista ja kuiturainan muodostumistavasta. Paperin huokostilavuus riippuu materiaalikomponenttien lisäksi paperin tiivistymisestä valmistusprosessin aikana /15/.

Paperin huokoisuuteen ja huokosrakenteen vaihteluihin voidaan vaikuttaa seuraavilla tekijöillä /15/:

- materiaalikomponenttien ominaisuuksilla (mm. jauhatuksen lisääminen pienentää huokoskokoa ja huokosten määrää)
- materiaalin jakautumisella arkin tasossa, millä tarkoitetaan lähinnä formaation huonontumisesta aiheutuvaa huokoisuuden lisääntymistä
- z-suuntaisella materiaali- ja tiheysjaukaumalla voidaan vaikuttaa huokoskokoon ja niiden määrään (mm. täyteaineiden jaukautuminen).

Lisäksi paperin huokoisuuteen voidaan vaikuttaa pintaliimauksella. Pintaliiman sekaan voidaan lisätä huokoisuutta pienentäviä aineita, mutta niillä on huonon sitoutuvuuden vuoksi pölyämistä lisäävä vaikutus.

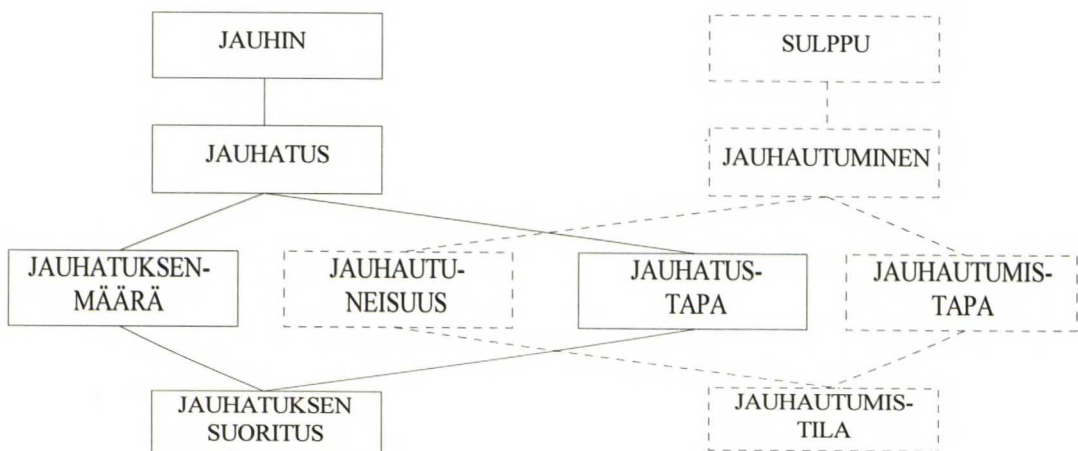
5. SELLUN JAUHATUS

5.1 Yleistä

Sellukuidut eivät sovellu kemiallisen ja fysikaalisen rakenteensa vuoksi sellaisinaan juuri minkään paperilajin valmistukseen. Jauhatuksen tarkoituksena on muokata kuitu- ja mekaanisen rasituksen avulla ja saada kuituun halutunlaisia rakenteellisia muutoksia ilman, että kuitua vahingoitetaan liian paljon. Kaikkia haluttuja vaikutuksia ei kuitenkaan voida toteuttaa samanaikaisesti, vaan käytännössä pyritään saavuttamaan mahdollisimman edullinen kompromissi juuri kyseistä käyttötarkoitusta varten. Tämän vuoksi paperintekijän on tiedettävä täsmälleen mihin paperin ominaisuuksiin jauhatuksella voidaan vaikuttaa, ja miten niihin voidaan vaikuttaa.

5.2 Jauhatuksen käsitteitä

Arjas /34/ on esittänyt jauhatukselle kaksiosaisen käsitejärjestelmän, jota voidaan käyttää jauhatustuloksen analysointiin. Arjaksen esittämä käsitejärjestelmä on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Arjaksen esittämä jauhatuksen käsitejärjestelmä /34/.

Kuvan 3 mukaan jauhatusta kuvaavat käsitteet voidaan jakaa jauhimen ja sulppun kanalta tarkasteltuihin termeihin. Voidaan todeta, että jauhain jauhaa sulppua tietyllä jauhatustavalla tietyn jauhatuksen määrän ja samalla sulppu jauhautuu tietyllä jauhautumistavalla tiettyyn jauhatuksen määrän ja samalla sulppu jauhautuu tietyllä jauhautumistavalla tiettyyn jauhautuneisuuteen. Kun massa on jauhettu tietyllä tavalla tiettyyn jauhautuneisuuteen, on se saavuttanut tietyn jauhautumistilan.

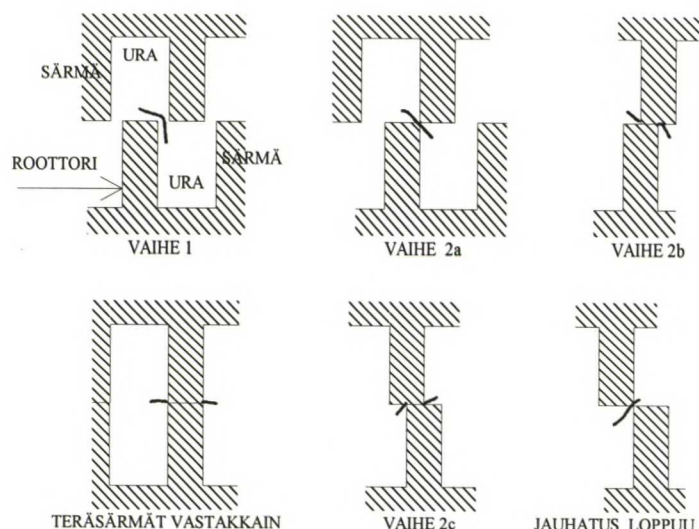
Jauhatustapaa kuvataan usein sanoilla raju tai varovainen, mutta myös ominaissärmäkuormalla (J/m). Jauhatustavalla pyritään vaikuttamaan massan jauhautumistapaan. Jauhatuksen määrää sen sijaan kuvataan usein (netto)energian kulutuksella massatonta kohden (kWh/t). Jauhatuksen määrällä pyritään vaikuttamaan massan jauhautuneisuuteen. Jauhautuneisuuden mittana voidaan käyttää mitä tahansa massan tai koearkin/paperin ominaisuutta, joka kehittyy jatkuvasti jauhatuksen edistyessä (yleisimmin sellulle käytetään SR -lukua).

5.3 Jauhatuksen mekanismi

Jauhatuksessa kuituflokkit kerääntyvät jauhimen liikkuvan terän (roottorin) etusärmälle ja jauhautuvat särmien ohittaessa toisensa. Terien välissä kuituihin kohdistuu erilaisia voimia, kuten veto- ja puristusvoimia kuidun akselin suunnassa, puristusta säteen suunnassa sekä hankaus- ja leikkausvoimia /35/.

Jauhatusmekanismin vaiheet voidaan jakaa kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa kuidut kerääntyvät teräsärmälle ja toisessa vaiheessa tehdään varsinainen jauhustyö /36/.

Varsinainen jauhustapahtuma jaetaan edelleen kolmeen vaiheeseen. Jauhatus alkaa, kun roottori- ja staattoriterän särmän etureunat kohtaavat toisensa ja lukitsevat kuitukimppun väliinsä. Tässä vaiheessa kuituun kohdistuu lyhyt, voimakas ja leikkaava puristusisku, joka kohdistuu hyvin pieneen osaan kuidusta. Toisessa vaiheessa tehdään suurin ja tärkein jauhustyö, kun molempien teräsärmien etureunat liukuvat kuitukimppua pitkin ja puristavat kuituja otsapintoja vasten. Vaiheen pituus on teräsärmien etureunojen vastakkaisten otsapintojen yli kulkeman matkan pituus. Kolmannessa vaiheessa kuitukimppu on edelleen puristuksissa teräsärmien otsapintojen välissä ja saa osakseen hankauskäsittelyä. Vaihe jatkuu, kunnes teräsärmien takareunat ohittavat toisensa /36/. Jauhatusmekanismin vaiheet on esitetty kuvassa 4.

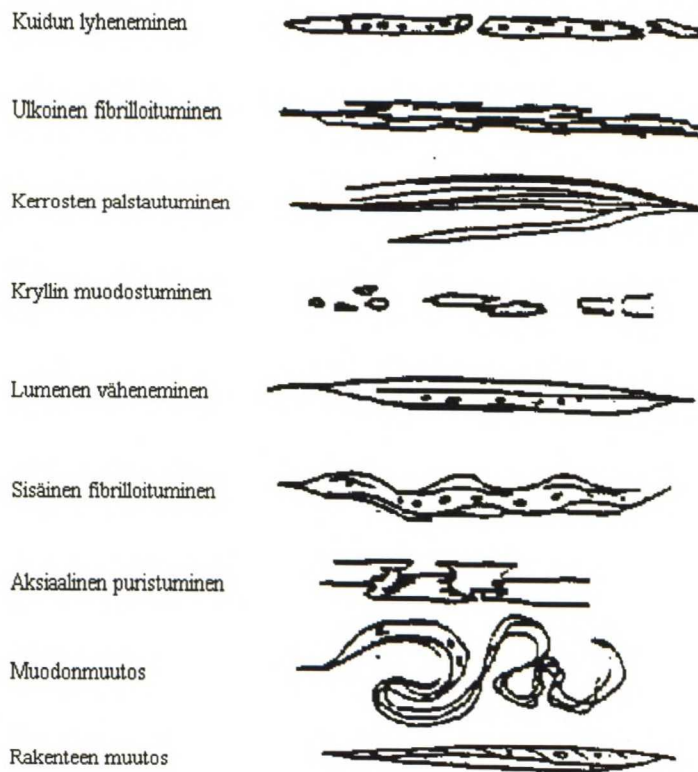


Kuva 4. Jauhatusmekanismin vaiheet /36/.

Energiaa siirtyy kuituihin jokaisessa vaiheessa, ja kokonaisjauhatusenergia on kaikkien vaiheiden summa. Se missä edellä kuvatuissa vaiheissa energia siirtyy kuituun riippuu hyvin pitkälle jauhimen terän geometriasta. Jos kuituun viedään suurin osa energiasta varsinaisen jauhatuksen ensimmäisessä vaiheessa, niin jauhuksesta tulee katkovaa. Mikäli energian käyttö keskittyy toiseen ja kolmanteen vaiheeseen, niin kuidut saavat fibrilloivamman jauhatuksen /35/.

5.4 Jauhatuksen perusvaikutukset

Jauhatus aiheuttaa suuren määrän erilaisia palautumattomia /37/ rakenteellisia muutoksia kuituun, joiden perusteella on mahdollista erottaa jauhamaton ja jauhettu kuitu. Kuvassa 5 on esitetty näitä vaikutuksia. Niitä vaikutuksia, joita ei voida enää jakaa komponentteihin, kutsutaan jauhatuksen perusvaikutuksiksi eli primäärivaikutuksiksi. Primäärivaikutusten toteaminen on usein vaikeaa, koska jauhamattoman massan kuitujen kokojakauma on varsin laaja, ja kuituseinämän kemiallinen koostumus sekä kemiallisten komponenttien jakautuminen kuituseinämässä vaihtelee. Tämän lisäksi jauhatus on luonteeltaan heterogeeninen satunnaisprosessi, missä yksittäisten kuitujen saama käsittely vaihtelee huomattavasti. Osa kuiduista voi välttää kokonaan jauhatuksen, kun taas osa kuiduista voi joutua rajun käsittelyn kohteeksi, jolloin ne saattavat hajota lähes täysin. Jauhatusvaikutus ei myöskään leviä tasaisesti pitkin kuitua, vaan vaikutukset ovat hyvinkin paikallisia. Tästä on usein seurauksena kuitujen katkeileminen ja kuituseinämän repeileminen /38/.



Kuva 5. Jauhatuksen vaikutuksia puukuituun /39/.

Kuidun saamia primäärivaikutuksia on luokiteltu useissa artikkeleissa /37, 40, 41, 42, 43, 44/. Seuraavassa on kuitenkin esitetty vain muutama yleisimmin kirjallisuudessa esiintyvä luokittelu. Lisäksi Rydin jaottelun pohjalta on primäärivaikutuksia käsitelty perusteellisemmin.

Ebeling /37,45/ on esittänyt primäärivaikutusten luokittelun rakenteellisen lähestymistavan pohjalta:

1. Kuidun sisäkerrosten välisten vetysidosten rikkoutuminen
2. Kuidun ulkoisten kerrosten rikkoutuminen ja lohkeaminen
3. Kuitujen katkeilu
4. Kuituseinämän paikalliset sijoiltaanmenot
- 5a. Kolloidisen polysakkaridiliuoksen muodostuminen kuidun pinnalle
- 5b. Kuidun komponenttiaineiden liukeneminen
6. Näkymättömien vaurioiden syntyminen

Ebeling /37,45/ on jaotellut jauhatuksen primäärivaikutukset myös perustuen termodynamiikan lakeihin:

1. Uusien pintojen muodostuminen
2. Uusien partikkelien muodostuminen
3. Rakenteellisten vaurioiden ja muutosten syntyminen

Ryti /40/ on puolestaan esittänyt primäärivaikutukset seuraavasti:

1. Primäärikalvon ja S_1 -kerroksen poistuminen
2. Sisäinen fibrillaatio
3. Ulkoinen fibrillaatio
4. Kuitujen katkeileminen
5. Hienoaineen muodostuminen

5.4.1 Primäärikalvon poistuminen ja sisäinen fibrillaatio

Primäärikalvo on vettä läpäisevä, mutta turpoamaton. Se estää kuitua turpoamasta eikä kykene muodostamaan sidoksia naapurikuitujen kanssa. Primäärikalvon poistuminen alkaa jo sellun keitossa ja valkaisussa, loput kalvosta poistuu jauhatuksen alkuvaiheessa /46,47/.

Sisäisellä fibrillaatiolla tarkoitetaan kuidun sisäisen rakenteen löystymistä /46/. Tämä on seurausta kuidun turpoamisen aiheuttamasta lamellien välisen amorfisen osan vetysidosten korvautumisesta OH-ryhmien ja veden välisillä vetysidoksilla. Sisäistä fibrillaatiota pidetään usein jauhatuksen tärkeimpänä vaikutuksena, koska sen seurauksena kuidusta tulee taipuisa ja mukautumiskykyinen /39/. Sisäisen fibrillaation kasvu lisää paperin näennäistiheyttä sekä veto-, taitto- ja palstautumislujuutta.

5.4.2 Ulkoinen fibrillaatio

Ulkoinen fibrillaatio tarkoittaa kuidun S_2 -kerroksen rakenteen löyhtymistä ja hajoamista. Se alkaa vasta, kun kuidun P ja S_1 -kerrokset ovat irronneet kokonaan. Ulkoisen fibrillaation seurauksena kuidun ominaispinta-ala kasvaa voimakkaasti, mikä puolestaan lisää kuitujen välisten sidosten muodostumista /47/.

5.4.3 Kuitujen katkeilu

Jauhatustapahtumassa tapahtuu aina kuitujen katkeilua. Katkeilun määrä riippuu jauhettavasta massalajista ja jauhatustavasta. Kuitujen katkeilu mielletään usein negatiiviseksi jauhatusvaikutukseksi, koska kuitujen katkeileminen vaikuttaa negatiivisesti lujuusominaisuuksiin. Arkinmuodostuksen tasaisuuden (pohjan) kannalta katkeilemisen merkitys on kuitenkin positiivinen /47/. Kuitujen katkeilua tapahtuu teoriassa silloin, kun kuidun paikallinen veto- tai leikkauslujuus ylitetään eikä kuitu kykene väistämään voiman vaikutusta. Jauhatuksen edistyessä kuitujen katkeamistodennäköisyys vähenee /45,48/.

5.4.4 Hienoaineen muodostuminen

Jauhatuksessa syntyy hienoainetta aina melko runsaasti. Jauhatuksessa muodostunut hienoaine sisältää kappaleita katkenneista kuiduista ja osia kuituseinämästä. Jauhatuksessa syntynyt hienoaine on erittäin sitoutumiskykyistä, ja lisää massan vetolujuuspotentiaalia ja kasvattaa suotautumismvastusta. Samalla se huonontaa massan dimensiostabiliteettia.

5.4.5 Kuidun komponenttiaineiden liukeneminen

Hemiselluloosat ja ligniinit ovat keskittyneet sellukuidun amorfiseen osaan mikrofibrillien väliin. Jauhatuksessa osa hemiselluloosasta ja ligniinistä liukenee veteen, valkaistuilla selluilla tyypillisesti 0,3 - 0,6 %, jauhatusoloista riippuen /46/. Liuenneet hemiselluloosat käyttäytyvät samaan tapaan kuin sidoslujuutta parantavat lisäaineet, koska ne sijoittuvat geeliksi kuitujen pintaan ja väleihin. Giertz /49/ on tutkimuksissaan todennut arkin lujuusominaisuuksien heikkenevän, kun hemiselluloosan määrää vähennettiin.

5.4.6 Jauhatuksen perusvaikutusten yhteenvedo

Levlin ja Jousimaa /48/ esittävät yhteenvedon jauhatuksen primäärivaikutuksista kuituun seuraavasti:

- Jauhatuksen alussa primääriseinän ja S_1 -kerroksen poistuminen luo edellytykset kuidun turpoamiselle ja muiden primäärivaikutuksien syntymiselle.
- Tämän jälkeen sisäisen fibrillaation seurauksena kuitu turpoaa ja siitä tulee joustava, mikä edesauttaa sidosten muodostumisessa muiden kuitujen kanssa.
- Kuidun ulkoinen fibrillaatio ja kuidusta liennut aines luovat edellytykset vahvojen kuitujen välisten sidosten muodostumiselle.
- Kuitujen katkeileminen ja hienoaineen muodostuminen vaikuttavat paperin ominaisuuksiin.

Primäärivaikutuksista voidaan lisäksi todeta, etteivät ne synny yksitellen, vaan samanaikaisesti syntyy useita vaikutuksia ja niiden määrä saattaa vaihdella huomattavasti /50/. Kaikkia vaikutuksia ei myöskään tapahdu jokaisessa jauhatusprosessissa. Nykytietämyksellä ei kuitenkaan pystytä selektiivisesti eliminoimaan jotain vaikutusta, kuten ei myöskään edistämään /48/. Tosin niiden kehittymisnopeuteen toisiinsa nähden voidaan vaikuttaa jauhatuksen muuttujilla. Primäärivaikutuksia ei myöskään voida asettaa tärkeysjärjestykseen, sillä halutut vaikutukset riippuvat valmistettavasta paperilaadusta, mm. säkkipaperi ja kopiopaperi vaativat luonteeltaan aivan erityyppisen jauhatuksen /50/.

5.5 Hienopaperimassan jauhatuksen vaikutus sulppuun ja paperiin

Jauhatuksen suuri merkitys paperinvalmistusprosessissa johtuu siitä, että se vaikuttaa lähes kaikkiin valmiin paperin ominaisuuksiin ja samalla myös paperikoneen toimintaan. Lisäksi jauhatuksella voidaan vaikuttaa merkittävästi raaka-aineseoksen koostumukseen, energian kulutukseen ja tätä kautta lopullisiin valmistuskustannuksiin.

Kopiopaperin tuoteominaisuuksien kannalta männyn jauhatuksen tarkoituksena on antaa kopiopaperimassalle lujuudet ja luoda edellytykset vahvojen sidosten syntymiselle. Koivumassalla puolestaan saadaan hyvät painatus- ja pintaominaisuudet, mutta toisaalta uusilla hienommilla terägeometroilla voidaan lyhytkuituinen massa jauhaa pidemmälle ja kehittää myös sen lujuusominaisuuksia /68/.

Sellukuitujen jauhatuksessa muodostuu hienoainetta kuitujen katkeilun ja fibrillaation seurauksena, mikä lisää kuitujen ja veden välisiä rajapintoja ja siten kuituun sitoutuneen veden määrää. Tämä huonontaa sulpun vedenpoisto-ominaisuuksia paperikoneen viiralla sekä lisää purituskapasiteetin tarvetta puristinosalla. Kuitujen jauhamisen

seurauksena kuiduista tulee joustavampia, taipuisampia ja usein myös lyhyempiä kuin jauhamattomista kuiduista, minkä ansiosta flokkien syntymistodennäköisyys vähenee /48/, ja jo syntyneet flokit ovat helpommin hajoitettavissa turbulenssigeneraattorin synnyttämällä turbulenssilla. Tämä ei kuitenkaan käytännön paperinvalmistuksessa välttämättä paranna formaatiota /28/.

Jauhatuksen vaikutus valmiin paperin ominaisuuksiin näkyy siten, että paperin rakenne tiivistyy, sileyden paranee, veto-, puhkaisu-, taitto- ja palstautumislujuus sekä venymä, kimmokerroin ja tiheys kasvavat. Vastaavasti opasiteetti, vaaleus, imukyky, dimensiostabiliteetti ja kokoonpuristuvuus pienenevät. Repäisyjuuden todetaan usein aluksi kasvavan, mutta kääntyvän nopeasti jauhatuksen edistyessä laskuun /36/. Jauhatuksen määrän on todettu lisäävän myös käyritystä /23/.

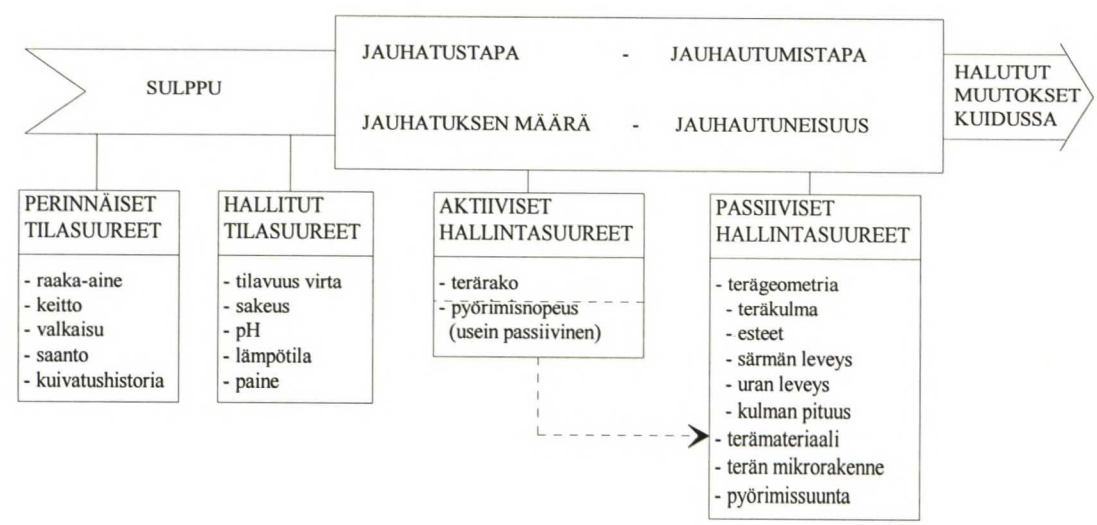
Kopiopaperin kannalta molempien massakomponenttien jauhatuksen määrän kasvaessa on vetolujuuden, kimmokertoimen ja ilmanläpäisyvastuksen voimakas kasvaminen edullista. Myös sileyden, puhkaisu- ja palstautumislujuuden kasvaminen on edullista. Haitallisimmin jauhatuksen määrän lisääntyminen vaikuttaa kopiopaperin optisiin ominaisuuksiin sekä dimensiostabiliteettiin.

Paperinvalmistuksen kannalta on oleellista saavuttaa juuri tietyille paperilajille tärkeät ominaisuudet. Mietittäessä jauhatuksen vaikutuksia kuitujen ja paperin ominaisuuksiin on syytä pitää mielessä, että jauhatuksen vaikutus saattaa erota tyypillisistä ominaisuuksien kehittymismalleista. Ominaisuuksiin vaikuttaa myös jauhatustapa (raju tai varovainen), kuten kaikki prosessin tila- ja hallintasuureet sekä jauhimen rakenneparametrit. Myöskään yksittäisistä massakomponenteista mitatut ominaisuudet eivät välttämättä korreloi massaseoksista mitattujen ominaisuuksien kanssa.

6. SELLUN JAUHATUKSEN HALLINTA

6.1 Yleistä

Jauhatuksen hallitsemiseksi on tiedettävä, mitkä tekijät vaikuttavat siihen. Syrjänen /52/ on esittänyt jauhatukselle kvalitatiivisen mallin (kuva 6), jossa hän esittää jauhatukseen vaikuttavia tekijöitä. Malli ei anna kuvaa suureiden määrällisestä riippuvuudesta, vaan esittelee tekijät, joilla on vaikutusta jauhatustulokseen. Malli ei ole myöskään tyhjentävä, vaan lopulliseen jauhatustulokseen vaikuttavat myös useat mallin ulkopuolelle jäävät tekijät.



Kuva 6. Jauhatusprosessin kvalitatiivinen malli /52/.

Mallissa mainittujen tekijöiden vaikutuksia on selvitetty lukuisissa jauhatustutkimuksissa, ja niiden pohjalta on esitetty useita teorioita jauhatustekijöiden hallitsemiseksi. Seuraavassa on esitetty teorioista ehkä yleisin ja eniten käytetty ominaissärmäkuorma-teoria (OSK-teoria) ja siitä edelleen kehitelty ominaispintakuormateoria (OPK -teoria).

6.2 Jauhatusteoriat

Jauhatusteorioiden avulla pyritään luomaan yhteys kuitujen rakenteellisten muutosten ja prosessin hallinta- ja tilasuureiden välille. Näitä ei ole kuitenkaan vielä pystytty täysin yhdistämään. Seuraavassa esitetyt jauhatusteoriat /53,54/ optimoivat pääasiassa

jauhimen toimintaa ja energiankulutusta. Näiden teorioiden lisäksi on suuri joukko muita teorioita, joita ovat kehitelleet mm. Danforth /55/, Stevens /56/ ja Kerekes /57/.

6.2.1 Ominaisrämmäkuormateoria

Brecht ja Siewert /53/ ovat kehittäneet matalasakeusjauhatuksen hallintaan soveltuvan ominaisrämmäkuormateorian. Teoria yksinkertaistaa jauhatustapahtuman hallintasuu-reet varsin pelkistettyyn muotoon. Teorian mukaan jauhatustapaa hallitaan ominaisrämmäkuormalla (J/m) ja jauhatuksen määrää jauhimen kuluttamalla puhtaalla ominais-energian kulutuksella (kWh/t) seuraavasti:

$$\text{Ominaisrämmäkuorma} \quad \text{OSK} = P_e / L_s \quad (3)$$

$$\text{Puhdas ominaisenergia} \quad \text{EOK} = P_e / m \quad (4)$$

$$\text{Lisäksi määritellään} \quad P_e = P_t - P_h \quad (5)$$

$$L_s = n \times L_p \quad (6)$$

$$L_p = Z_r \times Z_{st} \times I \quad (7)$$

missä	OSK	= ominaisrämmäkuorma (J/m)
	EOK	= puhdas ominaisenergian kulutus (kWh/t)
	P_e	= puhdas jauhatusteho (kW)
	L_s	= leikkausnopeus (km/s)
	m	= massavirta jauhimen läpi (kg/s)
	P_t	= kokonaisjauhatusteho (kW)
	P_h	= häviöteho (kW)
	n	= roottorin pyörimisnopeus
	L_p	= jauhinterien leikkauspituus (km/r)
	Z_r	= teräsärmien lukumäärä roottoriterässä
	Z_{st}	= teräsärmien lukumäärä staattoriterässä
	I	= teräsärmien kohtaamispuite

OSK-teoria perustuu olettamukseen, ettei teräspinnoilla ole vaikutusta jauhatuksessa, vaan jauhautuminen tapahtuu terän särmillä /53/. Lisäksi teoria edellyttää, että jauhi-men häviöteho mitataan ajettaessa terät auki ja jauhin vedellä täytettynä. Häviötehoon vaikuttaa kuitenkin hydraulisten häviöiden lisäksi mekaaniset häviöt ja sähkömoottorin hyötysuhde /53/.

Ominaisrämmäkuormateorian on todettu selittävän hyvin jauhatusta, kun muuttujina ovat teho ja terien leikkauspituus. Teoria jättää kuitenkin huomioimatta tärkeitä massasta, jauhimen rakenteesta ja ajo-oloista johtuvia tekijöitä, joilla on suuri merkitys jauhatustulokseen ja sen taloudellisuuteen. OSK-teoriaa käytettäessä onkin syytä tuntea sen rajoitukset. Seuraavassa on lueteltu tekijöitä, joita OSK-teoriassa ei ole huomioitu /37,54,58/:

- muu terägeometria kuin leikkauspituus (teräsärmen leveys, leikkauskulma, kuitujen ajautuminen teräsärmille, teräsärmien kohtaamisnopeus jne.)
- terämateriaali
- prosessiolosuhteet (jauhatussakeus, lämpötila, pH jne.)
- energian jako vaiheiden välille
- teräväli
- jauhimen pyörimissuunta

Myös puhtaan ominaisenergian kulutusta voidaan pitää epämääräisenä, sillä häviötehon mittaamiseen ei ole olemassa yksiselitteistä menetelmää /54/. Häviötehon suuruuteen vaikuttavat mm. teräväli, terien kuluminen ja jauhimen läpi virtaava massamäärä. Jauhatusta voidaan suorittaa myös yhdessä tai useammassa läpiajossa, jolloin jauhatustulos on erilainen, vaikka energian ominaiskulutus olisikin sama.

Näistä puutteista huolimatta teoria on ollut yksinkertaisuutensa vuoksi varsin käyttökelpoinen apuväline jauhatusprosessia suunniteltaessa ja mitoitettaessa, kun terägeometria (teräleveys, leikkauskulma ja terämateriaalit) ovat vertailtavissa jauhimissa samat /50/.

Teräsärmien kehittyminen uusien valmistustekniikoiden ansiosta kapeammiksi (vanhat 10-15 mm, uudet jopa 2 mm) on johtanut tilanteeseen, jossa OSK-teorian mukainen jauhatustavan kuvaus ominaisrämmäkuormalla ei vastaa enää odotuksia, ja saattaa johtaa virhepäätelmiin /54/. Lumiainen /59/ onkin osoittanut, että vakioidulla OSK-arvolla massan jauhautuneisuutta voidaan muuttaa pelkästään teräleveyttä muuttamalla. Tämä toteamus on ollut lähtökohtana Sunds Defibrator Jylhä Oy:llä, kun he ovat kehittäneet uutta ominaispintakuormateoriaa ominaisrämmäkuormateorian pohjalta.

6.2.2 Ominaispintakuormateoria

Lumiaisen /54/ mukaan uusi ominaispintakuormateoria antaa OSK-teoriaa käyttökelpoisemman menetelmän eräiden jauhatustulokseen vaikuttavien tekijöiden matemaattiseen kuvaamiseen. OPK-teoriassa on huomioitu seuraavia seikkoja, joita OSK-teoria ei tunne:

- ottaa huomioon teräsarmien leveyden ja kohtaamiskulman
- antaa jauhatuskujen suhteellisen lukumäärän (km/kg)
- antaa jauhatuskujen todellisen rajuuden (J/m²)
- antaa jauhatuskujen pituuden

Ominaispintakuormateoriassa OSK-teorian mukainen jauhatuksen määrä jaetaan kahteen osakomponenttiin:

$$EOK = IL \times IE \quad (8)$$

$$IL = \frac{L_s}{m} = \frac{EOK}{OSK} \quad (9)$$

$$IE = OSK \quad (10)$$

missä	EOK	= puhdas ominaisenergian kulutus (kWs/kg)
	OSK	= ominaissärmäkuorma (J/m)
	IL	= iskulukumäärä (km/kg)
	IE	= iskuenergia (Ws/m)
	L _s	= leikkausnopeus (km/s)
	m	= massavirta (kg/s)

Teorian mukaan tietyn suuruinen jauhatusenergia voidaan saavuttaa eri tavoin. Jauhatuskujen lukumäärän lisääntyessä pitää iskujen energian vastaavasti alentua, ja kääntäen, iskujen lukumäärän vähentyessä tulee iskuenergiaa lisätä /54/.

OSK-teorian mukainen ominaissärmäkuorma-arvo (J/m) huomioi ainoastaan puhtaan jauhatusenergian määrän teräsarmien kohtaamispituuden pituusyksikköä kohti. OPK-teoriassa ominaissärmäkuorma jaetaan puolestaan kahteen osakomponenttiin, joissa huomioidaan jauhatuskun pituus myös teräsarmien poikkisuunnassa. Näin se kertoo,

onko jauhatuskun energia siirretty kuitukimppuun pidemmän vai lyhyemmän iskun aikana /36/.

$$\text{OSK} = \text{OPK} \times \text{IP} \quad (11)$$

$$\text{OPK} = \frac{\text{OSK}}{\text{IP}} = \frac{P_e}{L_{as}} \quad (12)$$

$$\text{IP} = \frac{a_r + a_{st}}{2 \times \frac{\cos \alpha}{2}} \quad (13)$$

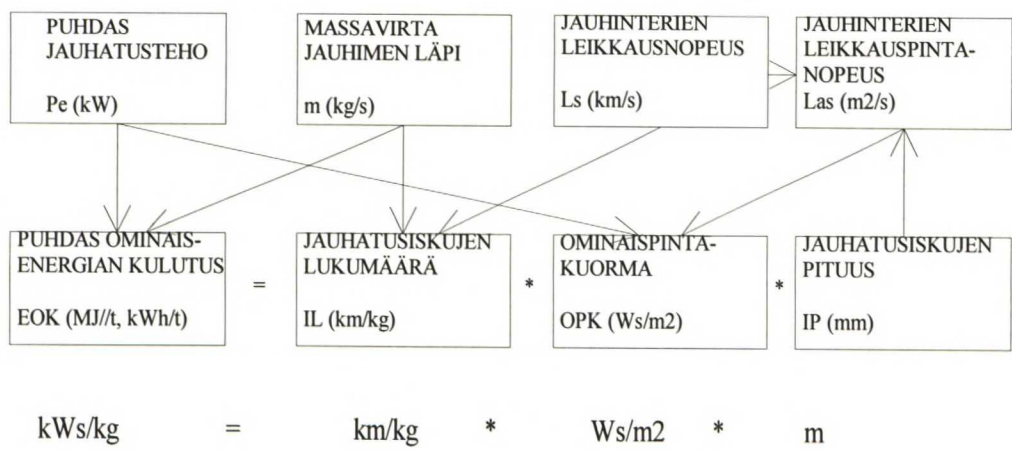
$$L_{as} = L_s \times I \quad (14)$$

missä	OSK	= ominaissärmäkuorma (J/m)
	OPK	= ominaispintakuorma (J/m ²)
	IP	= jauhatuskun pituus (mm)
	a _r	= roottoriterän teräsärmän leveys (mm)
	a _{st}	= staattoriterän teräsärmän leveys (mm)
	α	= teräsärmien välinen kohtaamiskulma
	P _e	= puhdas jauhatusteho (kW)
	L _{as}	= leikkauspintanopeus (m ² /s)
	L _s	= leikkausnopeus (km/s)

Teorian mukaan voidaan tietty jauhatuskun energia siirtää massaan eri tavoin. Käytetään joko lyhyitä ja rajuja iskuja tai pidempiä ja varovaisempia iskuja, joita vastaavat lukuarvot yhdessä kuvaavat jauhatustapaa /36/.

Laskettaessa ominaispintakuormaa (Ws/m²) on huomioitava, onko teräsärmän leveys suurempi kuin jauhautuva kuituflokki. Jos näin on, niin flokin pituus on iskunpituus (IP) /59/.

Jauhatustapahtuman hallintasuureiden välillä vallitsee kuvassa 7 esitetyt riippuvuussuhteet. Edellä esitetyn teorian mukaan puhdas ominaisenergian kulutus ilmaistaan jauhatuskujen lukumäärän (IL), rajuuden (ominaispintakuorma) ja pituuden (IP) tulona. Näiden tekijöiden keskinäiset suhteet vaikuttavat jauhatustulokseen.



Kuva 7. Ominaispintakuormateorian mukaiset suureet ja niiden väliset riippuvuudet /54/.

Vaikka uusi ominaispintakuormateoria tarjoaa Lumiaisen /54/ mukaan paremmat mahdollisuudet ennakoida jauhatustulos, ei tämäkään lähestymistapa ole vielä riittävä. Käytännössä jauhatustulos riippuu lukuisista tekijöistä, joista osaan vaikutetaan suunnitteluvaiheessa (jauhimien lukumäärä, tyyppi, koko jne.), osaa voidaan säätää prosessissa (mm. sakeus, tehot ja läpivirtaukset) ja osa määräytyy jauhatusjärjestelmän ulkopuolisista tekijöistä (mm. massan valmistusmenetelmä, kuivatushistoria ja kuitu morfologia).

7. JAUHATUSTULOKSEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

7.1 Yleistä

Jauhatustulokseen vaikuttavat lukuisat eri tekijät. Syrjänen on jaotellut tekijät tila- ja hallintasuureisiin. Tilasuureet hän jakaa edelleen perinnäisiin ja hallittuihin suureisiin. Hallintasuureet hän puolestaan jaottelee aktiivisiin ja passiivisiin hallintasuureisiin. Jaottelu on esitetty aikaisemmin kuvassa 6. Seuraavassa on esitetty eri tekijöiden vaikutuksia jauhatustulokseen edellä kuvatun jaottelun pohjalta.

7.2 Perinnäiset tilasuureet

Perinnäiset tilasuureet ovat sellaisia, joihin ei enää jauhimella voida vaikuttaa. Ne on "peritty" aikaisemmista prosessivaiheista. Tyypillisiä perinnäisiä tilasuureita ovat mm. kuitumorfologia, massan valmistusmenetelmä ja kuivatushistoria.

7.2.1 Kuitumorfologia

Puukuidun seinämän kerrokset eroavat toisistaan merkittävästi sekä rakenteellisesti että kemialliselta koostumukseltaan. Puusolujen dimensiot eivät vaihteile ainoastaan eri perintö- ja kasvutekijöiden vaikutuksesta eri puulajien kesken, vaan myös saman puulajin eri yksilöiden kesken, ja jopa saman yksilön rungon eri osien kesken.

Kuidun alkuperäisillä mitoilla on ratkaiseva merkitys siihen, millaista massaa siitä jauhatuksen jälkeen saadaan. Pitkien havupuukuitujen ensisijaisena tehtävänä on toimia "armeerausmassana", jolloin niiltä vaaditaan paperikoneen ajattavuuden takia hyvää lujuuspotentiaalia. Lehtipuumassan tehtävänä on antaa paperille hyvät painettavuusominaisuudet. Hyvä painettavuus edellyttää optisten ominaisuuksien lisäksi lehtipuukuitutujen riittävän hyvää sitoutumista paperirainaan etteivät ne irtoa rainasta aiheuttaen pölyämistä.

Kuidun hemiselluloosapitoisuuden kasvu lisää taipuisuutta ja turpoamiskykyä, mikä edesauttaa katkovien jauhatusvoimien välttämistä. Ligniinipitoisuuden kasvu vaikeuttaa jauhatusta, koska jäykkä ligniipitoinen kuitu ei pysty väistämään jauhatuksen

katkovaa vaikutusta yhtä hyvin kuin vähemmän ligniiniä sisältävä kuitu. Toisinsanoen hemiselluloosapitoisuuden nostaminen nopeuttaa jauhatusta ja ligniinipitoisuuden kasvu hidastaa sitä /45/.

Yhteenvedona kuitumorfologian vaikutuksesta jauhatukseen voidaan todeta, että jauhettaessa lehtipuukuituja on kysymyksessä lukumäärältään huomattavasti suurempi määrä pienempiä, jäykempiä, heikommin luhistuvia ja helpommin jauhautuvia sekä pienemmän flokkaantumistaipumuksen omaavia kuituja kuin jauhettaessa havupuukuituja.

7.2.2 Massan valmistusmenetelmä

Massan valmistusmenetelmällä ja valkaisulla on huomattava merkitys tarvittavaan jauhatusmäärään, joka vaaditaan tiettyyn jauhautuneisuuteen. Keiton ja valkaisun vaikutus perustuu kuituseinämän aineosien suhteelliseen muutokseen /60/. Yleensä vaadittava jauhatuksen määrä alenee massoilla seuraavassa järjestyksessä: tekstiilikuidut, valkaisematon sulfaattisellu, valkaistu sulfaattisellu, valkaisematon- ja valkaistu sulfiittisellu ja soodamassa /40/. Eri ryhmien sisällä on kuitenkin suuria eroja.

Myös massanvalmistusmenetelmillä on vaikutusta sellujen jauhautumiskäyttäytymiseen. Dillnerin ja Tibblingin /61/ tutkimuksissa on todettu, että TCF-massat jauhautuvat samaan SR-lukuun pienemmällä energian määrällä kuin ECF-massat. Toisinsanoen suotautumisvastuksella mitattuna TCF- massat ovat helpommin jauhautuvia. Samaa vetolujuuteen jauhettaessa tilanne on kuitenkin päinvastainen. Lumiaisen /70/ mukaan ECF-massat vaativat vetolujuus tasoon 70 kN/m noin 20 kWh/t enemmän jauhatusenergiaa kuin perinteisesti valmistettu massa.

Saanto vaikuttaa jauhatukseen ligniinipitoisuuden kautta. Ligniinipitoisuuden vähenyessä saanto laskee ja kuidusta tulee taipuisampi ja helpommin jauhautuva /47/. Saannon nostamisen seurauksena massojen jauhautuminen yleensä hidastuu, kun sitä arvioidaan vetolujuuden kehittymisenä jauhatusenergian funktiona, myös hienoaineksen muodostuminen lisääntyy /46/.

Valkaisu on itseasiassa keittoprosessin jatkoa. Valkaisussa poistetaan etupäässä vain kuituihin keiton jälkeen jäännyttä ligniiniä. Valkaisemattomat massat sietävät usein

rajumpaa jauhatusta kuin vastaavat valkaistut massat. Toisaalta kun massan ligniinipitoisuutta nostetaan normaalisaantoalueella, heikkenee massan kyky sietää rajua jauhatusta varsin nopeasti. Onkin ilmeistä, että kuitujen jauhautumisvastuksella on maksimi kuitujen ligniinipitoisuuden suhteen /62/.

7.2.3 Massan kuivatushistoria

Massaa kuivattaessa syntyy kuidun amorfisessa osassa vetysidoksia, joista osa on palautumattomia. Palautumattomia muutoksia alkaa syntyä kuidussa, kun kuiva-ainepitoisuus nousee 60 - 70 %:iin /48/. Samalla häviää pumppumassoille ominainen pieni ulkoinen fibrillaatio, sillä fibrillit sitoutuvat kuidun pintaan. Myöhemmin tapahtuvassa uudelleen kastumisessa ja jauhatuksessa esiintyvät turpoamisvoimat eivät pysty helposti murtamaan näitä sidoksia. Tämän takia kerran tai useammin kuivattu kuitu turpoaa vähemmän, ja sillä on pienempi sitoutumiskapasiteetti kuin kuivaamattomalla kuidulla. Kuivattu kuitu on lisäksi jäykempi ja hauraampi kuin kuivaamattomat kuidut, mikä johtaa jauhatuksessa suurempaan hienoaineen muodostumiseen /46,48/. Yksittäisten kuitujen pituuteen ja lujuuteen kuivatuksella ei kuitenkaan ole todettu vaikutusta /63/.

Kuivaamaton massa jauhautuu lujuusominaisuuksien suhteen, mutta usein myös SR-luvun kehityksellä mitattuna, nopeammin kuin kuivattu massa /46/. Siis kuivaamaton massa jauhautuu pienemmällä energian ominaiskulutuksella tiettyyn lujuustasoon kuin kuivattu massa /46,64/. Mäkelän /64/ tutkimuksissa kuivaamattomalla sellulla saavutettiin suurempi vetolujuus mutta pienempi repäisylujuus kuin kuivatulla sellulla. Pieni ominaissärmäkuorma oli molemmissa tapauksissa edullisempi repäisylujuuden kannalta.

Toinen ominainen piirre kuivaamattomille massoille on, että repäisylujuuden maksimi on lähellä jauhamatonta tilaa. Useissa tapauksissa huippu ei tule lainkaan esille, vaan repäisylujuus laskee jatkuvasti jauhatuksen alusta alkaen /46/.

On myös raportoitu, että kuivaamaton massa sietäisi rajua jauhatusta hieman paremmin kuin kuivattu massa. Erot tässä suhteessa ovat kuitenkin varsin pienet /64/. Kutistumispotentiaali kuivaamattomalla massalla on suurempi /39/ ja kasvaa nopeammin jauhatuksen edetessä. Sama pätee, kun kutistuminen piirretään vetolujuuden

funktiona. Tästä seuraa, että valmiin paperin potentiaalinen kutistuma tietyssä vetolujuustasossa on kuivaamattomalle massalle huomattavasti suurempi kuin kuivatulle massalle /48/. Kuivatusta sellusta valmistetun arkin tiheys on pienempi ja rakenne avonaisempi kuin kuivaamattomasta sellusta valmistetun /64/.

Taavitsainen /65/ teki diplomityössään kokeita kuivaamattomilla ja kuivatuilla valkaistuilla koivu- ja mäntysulfaattimassoilla ja totesi, että kuivaamattoman koivumassan käyttöpotentiaali hienopaperissa oli paperiteknisesti lähes samaa luokkaa kuin kuivatun. Energian kulutuksen kannalta kuivaamattoman massan käyttö oli kuitenkin huomattavasti kannattavampaa, erityisesti kun käytettiin varovaista jauhatustapaa.

Mäntymassoilla suoritetuissa kokeissa hän sai tuloksen, jossa kuivatun mäntymassan valonsirontakerroin, repäisyindeksi ja kutistuma olivat selvästi paremmat kuin kuivaamattoman massan. Tuloksista Taavitsainen /65/ päätteli, että kuivatun mäntymassan hienopaperitekkinen potentiaali oli selvästi parempi kuin kuivaamattoman mäntymassan. Tutkimusten mukaan mäntymassa kesti rajua jauhatustapaa verraten hyvin.

7.3 Hallitut tilasuureet

Hallitut tilasuureet, joista voidaan käyttää yhtä hyvin nimeä prosessiolosuhteet, ovat suureita, joilla voidaan merkittävästi vaikuttaa jauhatukseen. Ne pyritään kuitenkin vaikioimaan prosessin hallittavuuden ja tasalaatuisen jauhatustuloksen saavuttamiseksi.

7.3.1 Sakeus

Käsiteltäessä matalasakeusjauhatusta (sakeus 2 - 6 %) on oikea jauhatussakeus hyvin merkittävä tekijä. Jauhatussakeus vaikuttaa suoraan jauhimen hydrauliseen kapasiteettiin, kuitujen viipymäaikajakaumaan jauhimessa /66/ ja kuidun muokkaantumiseen. Varsinkin lehtipuumassoilla jauhatussakeudella on suuri vaikutus jauhautuvuuteen /67/. Yleisesti voidaan todeta, että jauhatussakeuden kasvaessa jauhimien teräväli kasvaa, jonka seurauksena jauhatus muuttuu varovaisemmaksi. Alle 2,5 %:n jauhatussakeutta tulee välttää, sillä se lisää kuitujen katkeilua /67/, lyhentää terien käyttöikää ja rajoittaa maksimaalisen syötettävän jauhatusenergian määrää /66/. Toisaalta myös yli 6 %:n sakeus saattaa aiheuttaa käsittelyongelmia, etenkin pitkäkuituisilla massoilla.

Havupuumassoille optimaalinen jauhatussakeus liikkuu viitteiden /39,68,69/ mukaan laajalla alueella 3,5 - 6,0 %:n välillä. Optimaaliseen sakeuteen vaikuttaa mm. käytetty jauhin tyyppi. Lumiaisen mukaan Conflo kartiojauhimille männyn optimaalinen jauhatussakeus on 3,5 - 4,0 % /70/. Lehtipuumassoille voidaan tapauskohtaisesti käyttää suurempiakin sakeuksia /69,70/, tyypillisesti 4,0- 6,0 %, jotta vältettäisiin kuitujen katkomista ja lisättäisiin kuitujen välistä kitkaa /68/.

Oikean jauhatussakeuden lisäksi on tärkeää pitää se mahdollisimman vakiona, sillä sakeuden vaihtelu vaikuttaa sellun laatuun ja terien käyttöikään.

7.3.2 Kemiallinen ympäristö

Integroidussa paperitehtaassa sellutehtaalta tuleva putkisellu on hapotettu alhaiseen pH -arvoon. Hapotuksen tarkoituksena on poistaa sellusta valkaisukemikaalin jäänteitä ja tehostaa vedenpoistoa mahdollisella kuivauskoneella. Alhainen pH voi kuitenkin aiheuttaa hiilihydraattien pilkkoutumista, mikä heikentää lujuuksia ja lisää liuenneiden aineiden määrää kiertovesissä /71/.

pH:n vaikutus kuitujen jauhautumiseen ja paperitekniisiin ominaisuuksiin perustuu kuitujen turpoamistaipumuksen muutoksiin. pH:n nosto edesauttaa kuidun sisäkerrosten välisten vetysidosten purkautumista, mikä puolestaan vähentää kuidun jäykkyyttä ja haurautta ja lisää kuidun komponenttiaineiden liukenemista. Korkeassa pH:ssa kuidun hydraatio ja fibrilloituminen ovat todennäköisempöä, mikä puolestaan vähentää hienoaineen muodostumista ja mahdollistaa nopeamman lujuusominaisuuksien kehittymisen /71,72/, koska joustavammat kuidut absorboivat teräsarmien iskut katkeamatta /66/.

Kuitujen ominaisuuksien on todettu kehittyvän pienemmällä energian määrällä neutraalissa ja lievästi alkalisessa ympäristössä kuin happamissa olosuhteissa. Suositeltava pH -alue jauhatuksen kannalta on Reevesin /39/ mukaan välillä 5,0 - 9,0 välillä. Tämän pH -alueen ulkopuolella alkavat elektrolyytit vaikuttaa haitallisesti, mikä yleensä näkyy jauhatusasteen alenemisena tietyllä jauhatusenergialla /39/.

Mäkelän /64/ mukaan korkea pH jauhamisvaiheessa nopeuttaa jauhautumista, kun tarkastellaan vetolujuuden kehittymistä jauhatusenergian ominaiskulutuksen funktiona.

On kuitenkin syytä todeta, että valkaistut sellut eivät ole yhtä herkkiä pH:n vaikutukselle kuin valkaisemattomat, sillä pH vaikuttaa lähinnä kuidun amorfisiin aineisiin, kuten hemiselluloosaan ja ligniiniin /73/.

On esitetty, ettei valkaistu sellu ole herkkä (käytännössä tunnoton) elektrolyyttipitoisuudelle ja muille kemiallisille jauhatusvaikutteille /74/. Kationeilla on kuitenkin negatiivinen vaikutus jauhatuksessa /75/, sillä tislatussa vedessä jauhettu massa jauhautuu nopeammin. Etenkin moniarvoiset kationit vähentävät hiilihydraatien liukoisuutta jauhatuksessa vähentämällä kuitujen turpoamista ja hidastaen samalla jauhautumista /71/. Elektrolyytit saavat aikaan hiukkasten dehydraation ja zetapotentialin alenemisen. Negatiivinen vaikutus lisääntyy ionien valenssiluvun kasvaessa /75/, joten varsinkin moniarvoisten kationien väkevyys esim. Al^{3+} ja Ca^{2+} tulisi pitää jauhatuksessa mahdollisimman alhaisena.

Nykyisin Ca^{2+} :n merkitys on kasvanut alunaa tärkeämmäksi, koska hienopaperiprosessit toimivat enimmäkseen neutraalilla alueella. Liitua täyteaineena käytävissä hienopaperitehtaissa Ca^{2+} -ionipitoisuus voi nousta korkeaksi sellun alhaisen pH:n vuoksi, mikäli hapan sellu neutraloidaan prosessissa paperitehtaan kalsiumkarbonaattipitoisella kiertovedellä. Näin siksi, että kalsiumkarbonaatin liukoisuus kasvaa voimakkaasti pH:n laskiessa. Korkeasta Ca^{2+} -ionipitoisuudesta puolestaan seuraa jauhautumisen hidastuminen kuidun pienemmän turpoamisen seurauksena /75/ ja vaahdonmuodostus sekä vaaleuden aleneminen /72/. Lisäksi Ca^{2+} -ioni pystyy sitomaan kuituun kiertoveden epäpuhtauksia ja muodostamaan saostumia lisä- ja uuteaineiden kanssa /72/. Haittavaikutukset voidaan kuitenkin minimoida lisäämällä NaOH:a ennen jauhautusta /71/.

7.3.3 Lisäaineet

Märänpään kemikaalit vaikuttavat myös vesikiertojen ja hylkyjärjestelmän kautta jauhatusprosessissa. Alumiini hidastaa lujuusominaisuuksien kehittymistä niin paljon, että alumiinivapaa systeemi voi lisätä lujuutta noin 10 % /39/. Tärkkelys ja CMC lisäävät jauhatusvaikutusta, mutta lujuuksiin niillä ei ole vaikutusta. Tosin kirjallisuudesta löytyy vastakkaisiakin näkemyksiä /76/. Erilaiset kuivalujaliimat parantavat paperin ominaisuuksia niin, että jauhatuksessa voidaan vähentää energiaa /39/. Erilaiset täyteaineet vaikuttavat myös kuidun lujuuden kehittymiseen ja lisäävät jauhimen terän kulumista.

Mäkelä /64/ tutki työssään pinta-aktiivisten aineiden vaikutusta jauhatukseen. Hän totesi, että jo 0,1 %:n lisäys pinta-aktiivista ainetta heikensi vetolujuutta ja lisäsi repäisylujuutta. Tästä pääteltiin, että ko. aineet estävät vetysidosten syntymistä ja vähentävät kuitujen katkeilua.

7.3.4 Muut

Lämpötilan vaikutus riippuu massan ligniinipitoisuudesta. Kemiallisten massojen paperitekniset ominaisuudet kehittyvät tehokkaammin matalassa lämpötilassa, kun korkeasaantoisten massojen ominaisuudet puolestaan kehittyvät paremmin korkeammissa lämpötiloissa /69/. Lämpötilan nostamisella on myös viskositeettia alentava vaikutus, samanlainen kuin sakeuden laskemisella /39/, ja tämä tekee jauhatuksesta katkovampaa. Lämpötila vaikuttaa myös kuidun turpoamiseen ja lasittumispisteeseen siten, että kuidun turpoaminen on voimakkaampaa alhaisessa lämpötilassa (turpoamismaksimi 5°C) /64/.

Paineen kasvaessa jauhimen syötön ja poiston välillä kuitujen katkeilu lisääntyy nopeammin kuin fibrilloituminen /39/. Jauhinten terien kuluessa kasvaa virtausvastus jauhimessa. Tällöin edellytetään suurempaa syöttöpainetta, jotta massa saadaan kulkemaan jauhimen läpi tasaisesti. Massan tasaisen jauhautuvuuden kannalta on tärkeää, että voidaan pitää yllä stabiilia paine-eroa jauhimen yli.

7.4 Jauhimen aktiiviset hallintasuureet

Jauhatuksen ainoa aktiivinen hallintasuure, jolla säädetään jauhatusta, on jauhimen teräväli. Pyörimisnopeus on usein vakioitu.

Matalasakeusjauhatuksessa teräväli on ainoastaan 0,1 - 0,2 mm ja sen stabiilisuus on erittäin merkittävää tasalaatuisen ja halutunlaisen jauhatustuloksen saavuttamiseksi /77/. Terävilillä säädetään kuituihin kohdistuvien iskujen voimakkuutta. Terävälän pienentäminen lisää jauhimen kuormitusta, mikä näkyy jauhimen käyttömoottorin tehonoton kasvuna /69/. Terävälän pienentyessä vähenee avoin tila terien välissä, mikä puolestaan vähentää läpivirtauskapasiteettia ja lisää jauhatusvaikutusta sekä muuttaa jauhatustapaa rajummaksi. Terävilillä on tietty minimi, mitä pienemmäksi sitä ei tulisi

säätää. Tällöin vältetään liialliselta kuitujen katkeilulta ja mahdolliselta terilleenajolta /69/.

Terävälän suuruuteen vaikuttavat syötettävän tehon lisäksi useat muut tekijät, kuten jauhatussakeus, jauhimen pyörimisnopeus ja -suunta, massalaji, massan tilavuusvirta ja jauhatustaste. Jauhatuksen hallittavuuden kannalta edellä luetellut tekijät tulisi pitää mahdollisimman vakioina. Jos samalla jauhimella esim. jauhetaan koivu- ja mänty-massaa, on koivun jauhatuksessa samalla teholla teräväli vain noin puolet männyn terävälisestä.

7.5 Jauhimen passiiviset hallintasuureet

7.5.1 Yleistä

Jauhimen passiivisilla hallintasuureilla tarkoitetaan jauhimen rakenneparametreja, joita ei voida enää ajotilanteessa muuttaa, vaan ne määräytyvät terän hankkimishetkellä. Jauhimen rakenneparametrit määräävät pitkälle terillä saavutettavan jauhatustavan.

Jauhimen rakenteellisilla tekijöillä voidaan vaikuttaa merkittävästi saavutettavaan jauhatustulokseen. Jauhinterien valmistajilla on tarjottavana suuri joukko erilaisia jauhinteriä, jotka soveltuvat erilaisille massoille ja erityyppisiin jauhatuksiin. Ebeling /51/ on esittänyt taulukon (taulukko 4), johon hän on koonnut tärkeimpien terägeometrioiden vaikutukset jauhatuksen luonteeseen.

Valittaessa teritystä tehdasmittakaavaiseen jauhatukseen on kiinnitettävä huomiota useaan seikkaan, kuten hydrauliseen kapasiteettiin, terien kulutuksen kestoon, terien vaatimaan energian kulutukseen sekä terillä saadun massan paperiteknisiin ominaisuuksiin, jonka tulisi olla terityksen tärkein valintakriteeri.

Taulukko 4. Jauhimen teritysparametrien vaikutukset jauhatustapahtuman luonteeseen /78/.

	ALUSTAVA FIBRILLOINTI	FIBRILLOINTI	KUITUJEN KATKOMINEN
TERÄSÄRMÄN LEVEYS - leveä > 10 mm - normaali n. 7 mm - kapea < 5 mm	xxx xx x	x xx xx	x xx xx
ROOTTORITERIEN TIHEYS - tiuha - harva	xxx x	xx xx	x xxx
STAATTORITERIEN TIHEYS - tiuha - harva	xxx x	xxx x	x xxx
TERIENVÄLINEN TÖRMÄYSKULMA - pieni 0..5 - keskim. 10..30 - suuri > 50	x xx xxx	xx xx xx	xxx xx x
TERÄMATERIAALI - kova - pehmeä	x xx	xx xx	xxx x
TERÄSÄRMÄN PYÖREYS - terävä - pyöreä	x xxx	x xx	xxx x
TERÄURIEN SYVYYS - syvä - matala	x xx	xx xx	xx x

x vaikutus vähäinen
xx melkoinen vaikutus
xxx suuri vaikutus

7.5.2 Terägeometria

Jauhimen terägeometrialla tarkoitetaan terän elementtien muotoilua, terähampaiden ja urien mittoja, roottori- ja staattoriterien väliin jäävää leikkauskulmaa ja virtausesteitä kanavissa /79/.

Jauhimen terä koostuu suuresta määrästä terähampaita, jotka ovat kiinni terän rungossa. Terägeometrioiden erilaisten variaatioiden lukumäärä on lähes rajaton. Ainoat rajoitukset asettaa terien valmistusprosessi, joka määrittelee kuinka kapeat terähampaiden välit (urat) voivat olla. /69/

Terägeometria on ratkaiseva tekijä jauhimen toiminnan kannalta. Seuraavassa on esitetty erilaisia terän suunnittelussa ja terityksen valinnassa huomioitavia seikkoja, joilla on merkittävä vaikutus jauhatustulokseen ja jauhimen hydrauliseen kapasiteettiin.

Terähampaan särmä

Terähampaan särmä on ominaissärmäkuormateorian mukaan paikka, jossa valtaosa tehollisesta jauhatuksesta tapahtuu. Terähampaan särmän kunto, terävyys, on erittäin tärkeä tekijä jauhatustuloksen kannalta. Jauhimet, joissa särmät ovat kuluneet ja pyöristyneet, vaativat pidemmän käsittelyajan (enemmän energiaa) samoihin massan ominaisuuksiin kuin terävillä terillä jauhettaessa (usein johtaa alhaisempaan freeness-tasoon) /39/. Ominaispintakuormateoria huomioi terähampaan särmän terävyyden iskupituudessa siten, että mitä pyöristyneempi särmä sitä suurempi on iskunpituus /59/.

Tylsät terät suosivat kuidun fibrillointia, joka johtaa paperin parempaan puhkaisu-, veto- ja repäisyjuuteen kuin terävillä terillä jauhettaessa. Ne vaativat kuitenkin pidemmän käsittelyajan (enemmän energiaa) samoihin massan muihin ominaisuuksiin (usein paljon alhaisemmalla freeness tasolla). Terävillä terillä saadaan siis helpommin kuivuvaa massaa, ja näin säästetään energiankulutuksessa jauhettaessa vakiofreenekseen.

Terähampaan leveys

Kapeammat hampaat mahdollistavat lukumääräisesti useampien hampaiden olemassaolon. Tämä puolestaan lisää hampaiden särmien lukumäärää. Ominaissärmäkuormateorian mukaan pidettäessä muut parametrit vakioina jauhatus muuttuu varovaisemmaksi, vähemmän kuituja katkovaksi ja enemmän fibrilloivaksi. Liian leveät hampaat saattavat aiheuttaa terien toispuoleisen kulumisen, koska jättöpuolella ei ole jäljellä massaa, joka kantaisi kuormaa. Hampaan leveys ja asennustiheys määräävät pitkälle jauhimen läpäisykapasiteetin /69/.

Lumiainen /59/ on tutkinut terähampaiden leveyden merkitystä kehittäessään ominaispintakuormateoriaa ja hän on tehnyt seuraavia johtopäätöksiä jauhettaessa valkaistua mäntysulfaattimassaa:

- liian kapeahampaaiset terät alhaisillakin OSK-kuormilla aikaansaavat heikompia kuituja kuin leveähampaaiset suurilla OSK-kuormilla

- kapeahampaiset terät vaativat enemmän energiaa kuin leveähampaiset jauhettaessa samaan SR-tasoon
- leveät terähampaat lyhentävät kuidunpituutta ja tuottavat hienoaainetta enemmän kuin kapeat hampaat heikentämättä kuitenkaan lujuusominaisuuksia
- kapeat terähampaat katkovat kuituja enemmän kuin leveät

Ominaispintakuormateorian myötä terähampaan leveyden merkitys on lisääntynyt. Lumiainen /59/ esittää, että jauhatustulokseen voidaan vaikuttaa merkittävästi muuttamalla vain terähampaan ja uran leveyttä, kun ominaissärmäkuorma pidetään vakiona.

- kapeat terät ja leveät urat katkovat kuituja voimakkaasti, mutta suotautumisvastus kasvaa hitaasti
- leveät terät ja kapeat urat katkovat kuituja vähän, mutta lisäävät nopeasti veden suotautumisvastusta

Lisäksi terän leveyksiä valittaessa on huomioitava millaista massaa kyseisillä jauhimilla tullaan jauhamaan. Useista kapeista teräsärmistä koostuva terä voi soveltua hyvin hydraulisen kapasiteetin puolesta kuitupituudeltaan lyhyen massan jauhatukseen, mutta jos samoilla terillä yritetään jauhaa pitkäkuituista massaa, saattaa hydraulinen kapasiteetti pudota alle puoleen /80/. Jauhatustuloksen kannalta on vaarallisempaa käyttää hienoja, ohuita terärakenteita pitkäkuituisille ja vahvoille massoille kuin karkeita terärakenteita lyhytkuituisille ja heikoille massoille /81/.

Ominaissärmäkuorma- ja ominaispintakuormateorian pohjalta voidaan antaa tiettyjä suuntaa antavia ohjeita, miten erilaisia massoja tulisi jauhaa, mutta jokainen tilanne on tutkittava tapauskohtaisesti, sillä kaikilla paperilajeilla on omat erityiset vaatimuksensa /82/:

- lyhyet ja heikot kuidut vaativat lyhyen (kapea hammas) ja alhaisen iskutehon (J/m^2)
- pidemmät ja vahvemmat kuidut vaativat pidemmän ja suurempi tehoisen iskun
- kuitujen katkominen vaatii lyhyemmän ja suurempi tehoisen iskun kuin kuitujen fibrillointi

uran leveys ja syvyys (teräkorkeus)

Kun uran leveyttä ja syvyyttä vähennetään kasvaa jauhatusvaikutus ja hydraulinen kapasiteetti pienenee. Tämä kapasiteetin pieneminen voidaan jossakin määrin korvata lisäämällä massan syöttöpainetta tai kasvattamalla teräsärmien kohtaamiskulmaa /69/. Liian syviä uria tulee kuitenkin välttää, sillä massalla on taipumus kulkea syvässä urassa jauhimen läpi saamatta mekaanista käsittelyä. Lisäksi syvillä urilla on taipumusta lisätä jauhimen häviötehoa. Lumiainen /80/ on todennut tutkimuksissaan, että mitä pidempiä ja karheampia kuidut ovat, sitä leveämpiä urien tulee olla. Näin kuiduilla on riittävästi tilaa kulkea jauhimessa. Halme ja Syrjänen /85/ ovat puolestaan tutkimuksissaan havainneet, että urasyvyyden kasvaessa paluuvirtausten määrä jauhimissa kasvaa.

Teräkorkeuden valinnassa on usein tehtävä kompromissi häviöteho- ja teräkustannusten välillä. Jos valitaan terät, joissa kulumisvara on pieni (matalat terät), niin teräkustannukset hallitsevat. Mutta valittaessa liian korkeat terät, lisääntyvät kustannukset häviötehon kasvettua. Terät tulisikin valita aina ensisijaisesti halutun jauhatustuloksen mukaan.

leikkauskulma

Leikkauskulmalla tarkoitetaan jauhimen roottori- ja staattoriterän teräsärmien välistä kulmaa. Leikkauskulmalla on merkitystä jauhimen jauhatustapaan ja energian kulu- tukseen /62/. Leikkauskulmalla on merkitystä myös iskunpituuteen, kuten ominaispin- takuormateorian kaavoista voitiin havaita.

Jauhatusvaikutusta voidaan lisätä kasvattamalla teräkulmaa, jolloin teräsärmän reunan kokonaispituus kasvaa. Suuremmat kulmat antavat fibrilloivan jauhatuksen, kulman pienentäminen puolestaan johtaa katkovamman (hienoaineen muodostus lisääntyy) jauhatuksen suuntaan.

Toisaalta on syytä todeta, että suuri teräkulma nopeuttaa jauhautumista tiettyyn free- ness-tasoon, lisää jauhimen hydraulista kapasiteettia ja paineen kehitystä jauhimessa, mutta toisaalta myös lisää häviöenergian määrää /39,66,69/. Leikkauskulman vaikutus jauhimen hydrauliseen kapasiteettiin voi olla huomattava. Suuren leikkauskulman pumppausvaikutus saattaa aiheuttaa jopa hallintavaikeuksia jauhimessa.

Käytännössä on kuitenkin todettu, ettei kartiojauhien terien teräkulmissa kannata käyttää kovinkaan laajaa skaalaa. Käytäntö on sanellut matalasakeusjauhatukseen sopivimmiksi teräkulmiksi noin 18 astetta. /86/

virtausesteet l. padot

Virtausesteiden tarkoituksena on varmistaa, ettei massa kulkeudu jauhimen läpi teräurissa ja toisaalta hillitä pumppausvaikutusta. Virtausesteet luonnollisesti vähentävät läpivirtauskapasiteettia ja muuttavat jauhinterän kulumista epätasaisemmaksi. Virtausesteiden käyttö on varsin harvinaista matalasakeusjauhinratkaisuissa ja ne kuuluvat lähinnä hierrejauhimiin /86/.

terämateriaali

Terämateriaalin merkitys on varsin huomattava jauhatustuloksen kannalta. Ideaaliselta terämateriaalilta vaaditaan useita ominaisuuksia. Sen tulisi säilyttää teräsärmän terävyys, olla riittävän vahvaa kulumista ja murtumista vastaan, säilyttää tietty teräpinnan karheus, olla korroosion kestävää alhaisissa pH-arvoissa ja omata sellaiset valuominaisuudet, että siitä voidaan valmistaa hienoja, kapeita terägeometrioita. Lisäksi materiaalin tulisi olla edullista /87/.

Terämateriaalin vaikutusta jauhatukseen voidaan selittää terämetallien erilaisilla kovuuksilla ja pinnan mikrokarheudella. Kovista metalleista valmistetun terän särmät eivät kulu ja pyöristy yhtä helposti, kuin pehmeistä metalleista valmistettujen. Mikrokarhean terämateriaalin on todettu parantavan massan lujuusominaisuuksia, katkovan vähemmän kuituja /42/ ja pienentävän jauhatuksen energiankulutusta /50/.

Lumiainen /59/ on todennut terien kunnosta seuraavaa:

- suhteellisen terävät teräsärmät ja karheat pinnat jauhavat hyvin
- pyöristyneet teräsärmät ja kiilloittuneet pinnat eivät saa kuidusta otetta, eivätkä ne jauha

käyttöikä

Terän käyttöikään vaikuttavat useat eri tekijät. Korroosio (lähinnä pH), terämateriaalin kulutuksen kesto, jauhettavan massan ominaisuudet (itse massa, sulpun puhtaus ja

lisäaineet) ja mahdolliset terävauriot (terilleenajo ja ylikuumeneminen) vähentävät terän käyttöikää. Lisäksi vakioidut massavirta, sakeus ja teho lisäävät terien käyttöikää /69/. Myös terägeometria vaikuttaa käyttöikään siten, että matalat urat lyhentävät sitä /77/.

Yleensä terän loppuunkuluminen havaitaan kuidun laadun ja läpivirtauksen heikkene- misestä alle hyväksytyn tason /69/. Nämä eivät kuitenkaan välttämättä ole keskenään samanaikaisia tapahtumia, joten ainoastaan terän korkeuden kulumisen perusteella ei terän vaihtoajankohtaa voida määrittää. Joissakin tehtaissa on vaihtoajankohta määri- tetty teräsärmän pyöristymisen ja siitä johtuvan laadun heikkenemisen perusteella. Toisissa tehtaissa terät vaihdetaan, kun syöttöpumppu ei kykene riittävästi lisäämään terien kulumisen aiheuttamaa painehäviötä jauhimen yli. Joissakin tapauksissa terän kulumisen ei juurikaan näy massan ominaisuuksissa, mutta kulunut terä kuluttaa huo- mattavasti enemmän energiaa samaan freeness-tasoon jauhettaessa, kuten taulukosta 5 voidaan havaita.

Taulukko 5. Terän kulumisen vaikutus massan ominaisuuksiin, energian kulutuk- seen ja jauhimessa vallitsevaan paineeseen /69/.

	Uusi terä	Kulunut terä
Freeness, ml	475	475
Katkeamispituus, km	5,5	5,3
Puhkaisuindeksi, kPa.m ² /g	3,7	3,4
Repäisyindeksi, mN.m ² /g	8,1	7,6
Netto teho hp-vrk/ton	2,1	3,6
Sisääntulo paine, psig	36	43
Ulosmeno paine, psig	70	53

7.5.3 Pyörimisnopeus ja -suunta

Jauhinten terien pyörimissuunnalla on suuri merkitys. Läpivirtausta vastustava (pidät- tävä) suunta jauhaa nopeammin ja varovaisemmin kuin pumppaava suunta. Nopeampi jauhautuminen johtuu terien urissa lisääntyneistä paluuvirtauksista /64/. Jauhimen pyörimissuunnalla on vaikutusta myös kuitujen viipymäaikajakaumaan /88/ ja häviö- tehoon (pidättävällä suunnalla aina hieman suurempi häviöteho).

Kun pyörimisnopeutta suurennetaan jauhimen pyöriessä pumppaavaan suuntaan, li- sääntyy pumppausvaikutus ja massan kulku jauhimen läpi helpottuu.

Pyörimisnopeuden nosto nopeuttaa jauhatusta ja muuttaa sitä repäisylujuudella mitattuna varovaisemmaksi vakio-ominaissärmäkuormalla ajettaessa. Pyörimisnopeuden kasvaessa teräväli suurenee, mitä pidetään syynä jauhatuksen muuttumiselle varovaisemmaksi /64/, vähemmän katkovaksi. Jauhimen pyörimisnopeus vaikuttaa suuresti myös jauhatuksen tehokkuuteen. Pyörimisnopeuden noustessa puhtaan jauhatusenergian kulutus pienenee tiettyyn SR-lukuun tai vetoindeksiin pyrittäessä, mutta toisaalta häviöteho kasvaa eksponentiaalisesti pyörimisnopeuden kasvaessa /77,89/ ja siten tehokkuus pienenee nopeasti kehänopeuden kasvaessa /39/. Jauhimen pyörimisnopeudelle on olemassa optimi tehokkuuden ja energian kulutuksen suhteen /77/. Arjas /88/ on lisäksi todennut, että mitä alhaisempi on pyörimisnopeus sitä kapeammaksi kuitujen viipymäaikajakautuma tulee.

7.6 Jauhatusjärjestelmä

7.6.1 Jauhatuskytkentä

Jauhatuskytkentää rakennettaessa on tärkeää huomioida systeemin jauhatuskapasiteetin ja hydraulisen kapasiteetin yhdistelmä. Jauhatuskapasiteettia voidaan lisätä mm. kytkemällä jauhimia sarjaan. Hydraulisen kapasiteetin lisääminen voi edellyttää jauhimien rinnankytkentää. Sekä jauhatuskapasiteettia että hydraulista kapasiteettia voidaan lisätä myös jauhimen terän geometriaa muuttamalla. Kapasiteettien lisäksi jauhimien kytkentä vaikuttaa kuitujen viipymäaikajakaumaan jauhimessa /90/, kytkentä vaikuttaa myös jauhimien teräväliin. Jos useita jauhimia on kytketty sarjaan, niin jälkimmäisen jauhimen teräväli on aina pienempi kuin edellisen jauhimen teräväli /88/.

Usein rinnankytkentää pyritään välttämään prosessitekniisten vaikeuksien vuoksi ja siksi sitä käytetään vain, kun jauhatusenergian tarve on vähäinen tai tuotanto ylittää sarjaan kytkettyjen jauhinten kapasiteetin. Taatakseen kaikille kuiduille samankaltaisen käsittelyn rinnankytkentä edellyttää täsmällistä säätöä ja tunnettuja virtausmääriä kaikkien jauhimien läpi sekä samanlaisia (myös lukumääräisesti) jauhimia rinnakkaisilla linjoilla. Tämä voi olla käytännössä vaikea toteuttaa, sillä paineolojen vaihtelut rinnakkaisissa linjoissa vaikuttavat suuresti sulppuvirran jakaantumiseen. Paineoloihin puolestaan vaikuttavat useat seikat, mm. jauhimen terien kuluminen.

Sarjaankytkentä antaa massalle kapeamman viipymäaikajakauman, jonka seurauksena saadaan ominaisuuksiltaan homogeenisempää massaa kuin rinnankytketyistä

jauhimista /91/, koska kaikki kuidut joutuvat kulkemaan samojen jauhimien läpi. Tämä kytkentä sallii myös paremmat mahdollisuudet säätää jauhatusta eri vaiheissa (EOK:n jako ja terägeometriat). Sarjassa oleville jauhimille riittää massavirran hallintaan yksinkertainen sakeus- ja virtaussäätö. Virtauksen säätö jauhinten läpi voidaan suorittaa yhdellä venttiilillä viimeisen jauhimen jälkeen /39/.

7.6.2 Energianjako jauhimien kesken

Sundholm /92/ tutki diplomityössään EOK:n jaon merkitystä armeerausmassan jauhatuksessa ja totesi, että varovainen alku oli hieman edullisempi lujuuksien kannalta, mutta käytännössä EOK:n jaolla ei ollut merkitystä. Levlin /93/ on puolestaan tutkimuksissaan todennut, että rajuin jauhatustapa tulisi sijoittaa jauhatuksen alkuun.

Toisaalta voisi ajatella EOK:n ja jauhatustavan jaolla olevan merkitystä, silloin kun lyhytkuituisesta massasta on pulaa. Mäntylinjan ensimmäisessä vaiheessa voisi olla raju, katkova jauhatus, millä lyhennetään massaa hyvän formaatiopotentiaalin aikaansaamiseksi ja toisella (ja kolmannella jne.) fibrilloivalla vaiheella parannettaisiin lujuusominaisuuksia. Lumiainen /70/ esittää, että alussa kehittäisiin kuitua fibrilloimalla, ja katkova jauhatus olisi viimeisenä vaiheena.

8. KOPIOPAPERIN OPTIMAALISET JAUHATUSOLOSUHTEET

Kopiopaperin tyypilliset tuoremassakomponentit ovat lehtipuumassa 60 - 100 % (koivu, eukalyptus) ja havupuumassa 0 - 40 % (mänty). Tuoremassojen lisäksi valmistuksessa käytetään huomattavia määriä prosessissa syntyvää hylkymassaa sekä mm. täyteaineita, massaliimoja, värejä ja retentioaineita. Eri massakomponentit poikkeavat huomattavasti toisistaan niin dimensioiltaan kuin jauhatuskäyttämismiseltään. Tämän vuoksi optimaalisen jauhatustuloksen saavuttamiseksi eri massakomponentit tulisi jauhaa omissa jauhatuslinjoissaan matalasakeusjauhatusta käyttäen.

Kirjallisuuden pohjalta on mahdotonta löytää yksiselitteisesti oikeaa jauhatusstrategiaa kopiopaperin massakomponenttien jauhatukselle. Jokaisella tehtaalla, ja jopa jokaisella paperikoneella, on omat tyypilliset erityispiirteensä. Eri tehtaat käyttävät eri raaka-aineita (koivu - eukalyptus), erilaisessa suhteessa lyhyt- ja pitkäkuitusta massaa ja kuivatushistorialtaan erilaisia massoja (kuivaamattomia, osittain kuivattuja tai paalimassoja). Tämän lisäksi on käytössä eri tyyppisiä jauhimia (mm. levy- ja kartiojauhimet) ja lukuisa määrä jauhinterägeometroita. Luetteloa voisi jatkaa lähes loputtomasti, mutta jo tämän perusteella on selvää, että kirjallisuudesta löytyvät jauhatusolosuhteet ovat varsin ohjeellisia.

Jauhatustavasta tutkijat ovat lähes samaa mieltä. Kaikkien viitteiden mukaan koivumassa tulee jauhaa selvästi varovaisempaa jauhatustapaa (0,5 - 2,0 J/m) käyttäen kuin mäntymassa (1,4 - 4,0 J/m). Uusimmissa lähteissä /68,83/ korostuu koivun jauhatustavan muuttuminen entistä varovaisempaan suuntaan.

Oikeista jauhatuksen määristä koivu- ja mäntymassalle on kirjallisuudessa eriäviä mielipiteitä, eikä yksinomaan kopiopaperille ole esitetty mitään erityisohjeita. Vanhempien lähteiden mukaan koivua tulisi jauhaa melko vähän, 30 - 50 kWh/t ja mäntyä verraten paljon n. 150 kWh/t. Bakerin /68/ käsityksen mukaan terägeometrioiden kehittyminen entistä hienommiksi mahdollistaa massakomponenttien optimaalisen kehittämisen. Hänen mukaansa lyhytkuitusta (koivumassaa) tulisi jauhaa erittäin varovaista jauhatustapaa käyttäen jopa reilusti yli 100 kWh/t. Tällöin koivun vetolujuus saadaan kehittymään männyn tasolle ja koivun suuret putkilosolut saadaan pilkottua /68/. Samassa lähteessä esitetään, että mäntyä tulisi jauhaa rajumpaa jauhatustapaa käyttäen suunnilleen saman verran. Tällä tavalla saadaan kehitettyä männylle hyvät lujuusominaisuudet (eikä repäisyjuuutta menetetä).

Taulukkoon 6 on kerätty kirjallisuudessa esiintyviä koivu- ja mäntymassan jauhatusparametrejä. Taulukon ristiriitaisuudet johtuvat osittain siitä, ettei lähteissä ole mainittu millaisia muut jauhatusparametrit ovat.

Taulukko 6. Kirjallisuudessa esiintyvä suositeltavia jauhatusolosuhteita.

Massa	OSK, Ws/m	Jauhatuksen määrä, kWh/t	Sakeus, %	Terätyyppi	Lähde
Koivu	0,5 - 1,0	100 - 150	5,0 - 6,0	MX tai SM	/68/
"	1,4 - 2,2	79 - 118	2,0 - 3,5		/39/
"				SC	/98/
"	0,5 - 1,0				/83/
"	0,8	40			/99/
Mänty	1,5 - 3,0	80 - 120	4,0 - 6,0	AA (nyk. LM)	/68/
"	3,5	118 - 158	2,0 - 3,5		/39/
"				HH	/98/
"			3,5 - 4,0		/70/
"	3,0 - 4,0				/83/
"	1,9	85			/99/

9. KIRJALLISUUSOSAN YHTEENVETO

Kirjallisuusosan tavoitteena oli aluksi laatia kopiopaperille tuoteanalyysi ja selvittää sen perusteella kopiopaperin tärkeimpien ominaisuuksien ja jauhatuksen väliset riippuvuudet. Tätä varten kirjallisuusosassa käytiin seikkaperäisesti läpi myös matalasa-keusjauhatuksen mekanismi sen hallinta ja lopputulokseen vaikuttavat tekijät sekä pyrittiin lopulta löytämään optimaaliset jauhatusolosuhteet kopiopaperille.

Kopiopaperin tärkein ominaisuus kirjallisuuden perusteella on dimensiostabiliteetti ja kuumennuksen kestävyys. Dimensiostabiliteetista voidaan erottaa käyristyminen ja kupruilu. Käyristyminen vaikuttaa kopiokoneen/lasertulostimen ajettavuuteen ja kopio-oidun/tulostetun paperin käyttökelpoisuuteen. Kupruilu vaikuttaa näiden lisäksi kopio-/tulostusjäljen laatuun. Muita kopiopaperin tärkeitä ominaisuuksia ovat formaatio, huokoisuus, sileys, jäykkyys ja vaaleus.

Paperin dimensiostabiliteetti riippuu massakoostumuksen kosteuskäyttäytymisen lisäksi paperin rakenteellisista tekijöistä. Kirjallisuuden perusteella paperin mittamuu-toksiin vaikuttavat massaseos, komponenttien jauhatusmäärät, kuituorientaation voi-makkuus, orientaatiokulma, paperin toispuolisuus (orientaatiokulman, hieno- ja täyte-ainejakauman, tiheyden, vedenpidätykyvyn ja paperin lämpiämisen toispuolisuus) se-kä kuivatus.

Jauhatusteorioilla pyritään luomaan yhteys kuitujen rakenteellisten ominaisuuksien ja prosessin hallinta- ja tilasuureiden välille. Eniten jauhatusteorioista on käytetty omi-naissärmäkuormateoriaa ja siitä kehiteltyä ominaispintakuormateoriaa. Teoriat ovat kuitenkin varsin puutteellisia, koska ne jättävät huomioimatta useat jauhatustulokseen vaikuttavat tekijät mm. teräsärmän leveyden ja prosessiolosuhteet. Teoriat keskittyvät optimoimaan lähinnä jauhimen toimintaa ja energian kulutusta.

Jauhatustulokseen vaikuttavat lukuisat massan ja jauhimen ominaisuudet. Massaan vaikuttavat ns. perinnäiset tilasuureet, kuten kuitumorfologia, massan valmistusmene-telmä ja kuivatushistoria, joihin ei enää jauhimella voida vaikuttaa. Massan proses-siolosuhteilla, kuten sakeudella, pH:lla, lämpötilalla ja massan kemiallisella tilalla on myös merkittävä vaikutus massan jauhautumiseen. Jauhimen ominaisuuksista terävä-lillä säädetään kuituihin kohdistuvien iskujen voimakkuutta. Jauhimen rakennepara-metreilla (terägommetria, terämateriaali, pyörimissuunta jne.) vaikutetaan jauhimen jauhatustapaan.

Kirjallisuuden perusteella ei voida esittää yksikäsitteisesti optimaalisia jauhatusolosuhteita kopiopaperille, vaan jokainen prosessi on tutkittava tapauskohtaisesti. Yleisesti voidaan todeta, että koivumassalle sopii varovaisempi jauhatustapa ja korkeampi jauhatussakeus kuin mäntymassalle. Oikeasta jauhatuksen määrästä koivu- ja mäntymassalle esitetään ristiriitaisia näkemyksiä. Dimensiostabiliteetin kannalta kuivaaminen on molemmille massoille edullista. Jauhautuvuuden kannalta massat tulee jauhaa neutraalilla alueella mahdollisimman alhaisessa ionipitoisuudessa. Näiden tekijöiden lisäksi on tärkeää pitää kaikki muut olosuhteet mahdollisimman vakioina.

Diplomityön kirjallisuusosalle asetetut tavoitteet voidaan kokonaisuudessaan todeta saavutetun, mutta kirjallisuuden perusteella ei voitu löytää selvää yhteyttä kopiopaperin ja sen massakomponenttien jauhatukselle, kuten ei myöskään voida antaa selviä suosituksia eri massakomponenttien jauhatusmäärille.

KOKEELLINEN OSA

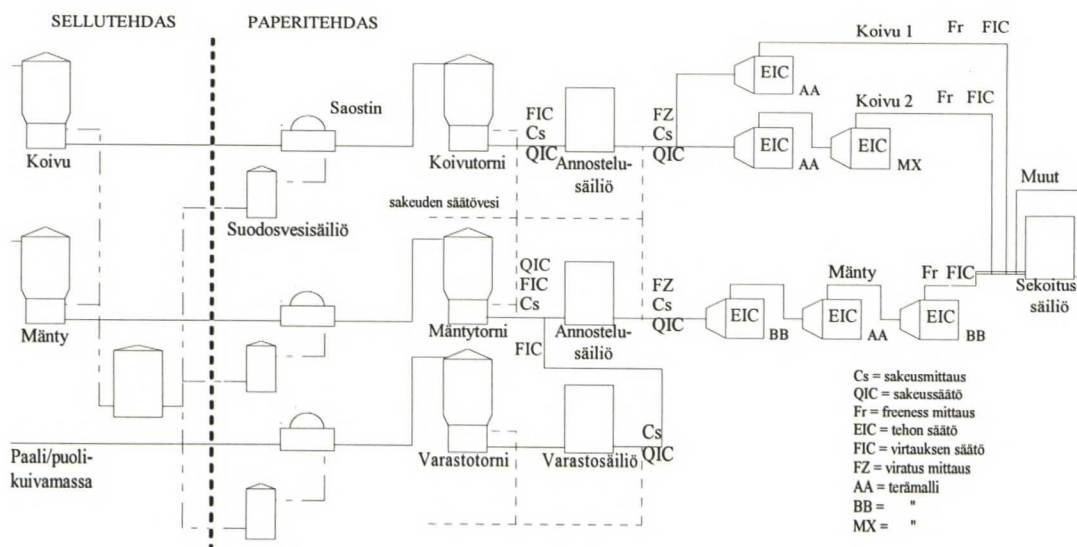
10. PK 9:n JAUHATUS- JA KIRTOVESIJÄRJESTELMÄ

10.1 Jauhatusjärjestelmä

Tässä luvussa esitellään PK 9:n jauhatusjärjestelmä ja seuraavassa luvussa sen kierto-vesijärjestelmä siinä laajuudessa, kuin se kokeellisen osan ymmärrettävyyden kannalta on tarkoituksenmukaista.

PK 9:llä käytetään kopiopaperin valmistuksessa tuoremassoina pääasiassa kuivaamattomaa ECF-koivumassaa ja osittain kuivatun ja kuivaamattoman ECF-mäntymassan seosta. Mäntymassan kuivaamisella pyritään parantamaan paperin dimensiostabiiliteettia. Osittain kuivattu mäntymassa koostuu pumppumassan ja kuiva-ainepitoisuuteen 80 % kuivatun mäntymassan seoksesta. Näiden mäntymassojen seossuhteena käytetään normaalisti 50 % / 50 %. Tällaisesta mäntymassaseoksesta tullaan jatkossa käyttämään nimitystä puolikuiva. Muina raaka-ainekomponentteina käytetään prosessissa syntyvää hylkyä sekä täyteaineita, massaliimaa, värejä jne.

Molemmat tuoremassakomponentit jauhetaan PK 9:llä erillisjauhatuksena omilla linjoillaan. Kuvassa 8 on esitetty PK 9:n koivu- ja mäntymassan jauhatus ja massankäsittely.



Kuva 8. PK 9:n jauhatusjärjestelmä.

PK 9:n jauhatusjärjestelmä koostuu kuudesta Jylhän JC-03 Conflo kartiojauhimesta. Liitteessä 1 on esitetty Jylhä Conflo JC-03 jauhimen tekniset tiedot. Kuvasta 8

nähdään, että mäntylinjalla on käytössä kolme sarjaan kytkettyä jauhinta. Ensimmäinen ja kolmas jauhin pyörivät pumppaavaan ja keskimäinen jauhin pidättävään suuntaan. Jauhatuslinjan käyttämä kokonaisenergia jaetaan pääasiassa tasan eri vaiheiden kesken.

Koivumassalle on jauhatuslinjan uusinnan yhteydessä rakennettu kaksi rinnakkaista linjaa. Koivu 1 käsittää yhden jauhimen ja koivu 2 kaksi jauhinta, jotka on kytketty sarjaan. Kaikki koivujauhimet pyörivät pumppaavaan suuntaan. Energia ja massavirta jaetaan siten, että koivu 1 saa niistä pääsääntöisesti 30 - 40 % ja koivu 2 saa loput 60 - 70 %.

Jauhatuksen määrää (jauhimen ottamaa tehoa) voidaan säätää jokaisen jauhimen osalta erikseen. Koivu- ja mäntyjauhinten pyörimisnopeudet on käytännön syistä vakioitu. Jauhatussakeus säädetään halutuksi annostelusäiliöiden jälkeisessä sakeuden mittauksessa ja säädössä. Jokaisen jauhatuslinjan jälkeen on kytketty in-line freenessmittarit massan jauhautuneisuuden mittaamista varten.

Jauhatusta säädetään prosessitietokoneella, jolle voidaan määritellä joko EOK:n, freeness tai imutelan tavoitearvo, jolloin jatkuvasti mittaamalla ja vertaamalla tavoitteeseen tietokone säätää teräväliä. Käytännössä PK 9:llä jauhatuksen säätö tehdään kuitenkin usein manuaalisesti säätämällä yksittäisen jauhimen ottamaa tehoa. Jauhinten kuormaa puolestaan säädetään valmiista paperista mitatun huokoisuuden mukaan.

Taulukoon 7 on kerätty tehdasjauhimissa käytetyt teritykset ja niiden hammasdimensiot sekä niillä saavutettavat tyypilliset ominaissärmä- ja ominaispintakuormat tehdasolosuhteissa. Jauhimessa käytetyt teritykset on esitetty jauhinkohtaisesti kuvassa 8.

Taulukko 7. Tehdasjauhimissa käytetyt teritykset ja niiden hammasdimensiot sekä niillä saavutettavat tyypilliset ominaissärmäkuormat ja -pintakuormat.

Terätyyppi	BB	AA		FF
Massa	Mänty	Mänty	Koivu	Koivu
Särmän leveys, mm	5,5	4,0	4,0	3,5
Uran leveys, mm	8,5	6,0	6,0	4,5
Leikkauspituus, km/r	6,1	11,6	11,6	18,5
Leikkauspinta-ala, m ² /r	35,3	48,8	48,8	66,1
OSK, J/m	6,0 - 6,5	3,1 - 3,4	2,4 - 3,2	1,0 - 1,1
OPK, J/m ²	n. 1100	n. 750	600 - 750	n. 300

10.2 Kiertovesijärjestelmä

PK 9:n kiertovesijärjestelmä jakautuu 1) paperikoneella syntyviin 0-vesiin, 2) kuidun talteenottoon ja 3) 0-vesitorniin. Paperikoneella syntyvät 0-vedet ohjataan viirakäivöön, kaukalovesisäiliöön, lukkovesikäivöön ja 0-vesisäiliöön. Syntyvistä 0-vesistä ohjataan 0-vesisäiliöön seuraavat jakeet:

- viirakäivön ylijoukko
- tasoimulaatikoiden vedenerottimilta erottunut vesi
- viiran imutelan kaukalovesi
- viiran palautustelojen suihkuvedet viiran levystöiltä
- 0-vesisuotimen vesi
- hylkysuotimen suodot
- tarvittaessa täydennysvesi suodatetun veden runkoputkesta

0-vesisäiliön pinnankorkeus pidetään vakiona ja ylimäärä vedestä, jota ei ohjata kiekkosuotimelle johdetaan 0-vesitorniin. 0-vesisäiliön vettä käytetään tämän lisäksi annostelusäiliöiden jälkeiseen sakeuden säätöön ja pyörrepuhdistuksen 5. vaiheen laimennusvetenä.

0-vesitornin tarkoituksena on toimia kiertoveden tasoitussäiliönä. Korkean kiertoveden kulutuksen aikana (esim. tuotantokatkot) tornista otetaan laimennusvettä hylyn hajoittamiseen, ja tasaisen tuotannon aikana sinne kerätään vettä. Torni (2 500 m³) on varustettu sekoittimella, joka estää hienoaineen kasautumisen tornin pohjalle. 0-vesitorniin ohjataan myös ylimäärä kiekkosuotimella syntyneestä samasta suodoksesta. Tornista vesi pumpataan suodatetun veden runkolinjaan, josta sitä käytetään mm. seuraaviin kohteisiin: männyn, koivun ja paalimassan varastotornin pohjalaimennukseen ja sen jälkeiseen säätöön sekä paalimassan varastosäiliön jälkeiseen sakeuden säätöön.

11. KARTOITUSKOEAJO

11.1 Tavoite

Kartoituskoeajon tavoitteena oli selvittää uusitun PK 9:n jauhatusjärjestelmän toiminta valmistettaessa korkealaatuista pintaliimattua 80 g/m² kopiopaperia. Tämän lisäksi pyrittiin selvittämään jauhatuksen toistettavuus ajettaessa normaaleilla massoilla. Lisäksi tuloksia käytetään myöhempien koeajojen referensseinä.

11.2 Koesuunnitelma

Koeajo aloitettiin säätämällä paperikoneen kuitujen ja lisä- ja täyteaineiden annostelut KymCopy Lux-lajin (vaaleus ISO 93) tavoitearvotaulukon mukaisiksi. Jauhimet säädettiin siten, että koivulinja 1:n kautta kulki 40 % massasta, ja se kulutti 40 % koivulinjojen energiasta. Jauhinten energiankulutus säädettiin siten, että valmiin paperin tavoite huokoisuus saavutettiin. Jauhatusjärjestelmän toimivuuden toteamiseksi otettiin näytteitä koivun ja männyn jauhatuslinjoilta sekä valmiista paperista. Kartoituskoeajossa näytesarjoja otettiin kaikkiaan kolmet (A-, B- ja C-näytteet).

Massanäytteet otettiin jauhamattomasta massasta, jauhatusvaiheiden jälkeisistä sekä sekoitussäiliön läpi menneestä massasta. Massoista määritettiin massaominaisuudet sekä valmistettiin standardin mukaiset laboratorioarkit, joista määritettiin tuoteanalyyysin perusteella perusteella keskeiset paperitekniset ominaisuudet. Näytesarjojen A ja B paperista otettiin myös poikkiratanäytteet popelta, joista määritettiin paperitekniset ominaisuudet.

11.3 Tulokset ja johtopäätökset

Kartoituskoeajotilanteesta otettiin siis kolmet näytteet, minkä tarkoituksena oli saada kuvaa sellutehtaalta tulevan massan laatuvaihteluista ja jauhatuksen toistettavuudesta, 23.1.1995 otettiin näytesarja A, 31.1.1995 näytesarja B ja 22.2.1995 näytesarja C. Näytteet saatiin otettua suunnitelman mukaan seuraavin poikkeuksin: 1) A-näytteitä otettaessa ei koivulinja 2:lla ollut käytössä 2. jauhinta ja näinollen massavirtaukset jaettiin koivulinjoille 1 ja 2 tasan, 2) eikä B-näytteitä otettaessa männyn puolikuiva- ja pumppumassan suhde ollut 50/50 vaan 40/60. Näitä poikkeuksia lukuunottamatta näytteiden A, B ja C massamääritysten tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään.

Tässä yhteydessä kartoituskoeajon tuloksista esitetään vain lyhyt yhteenveto. Tarkemmin tuloksia käsitellään luvuissa 14 ja 15. Kartoituskoeajon massamääritysten tulokset kokonaisuudessaan on esitetty liitteessä 2 ja paperimääritykset liitteessä 3.

11.4 Yhteenveto

Massamäärityksistä kävi ilmi, että massojen freeness kehittyi jauhatuksen alussa hitaammin. Jauhatuksen edetessä freenessin kehittyminen nopeutui. Jauhamattomien mäntymassojen lähtöfreeneksissä ei ollut eroja (B-näytteen mänty jauhautui hitaimmin), koivumassoilla eroa oli 45 ml. Männyn keskikuidunpituuden ei todettu lyhentyvän käytetyllä EOK:n alueella, mikä on kirjallisuuden perusteella selitettävissä jauhatuksen alussa kuitujen kiharaisuuden oikenemisena. Koivun keskikuidunpituudessa oli puolestaan havaittavissa selvä laskeva trendi. Pituusmassan määrityksissä ei havaittu säännönmukaisuutta, mikä todennäköisesti johtui mittauksesta.

Paperiarkkien formaatioindeksi heikkeni jauhatuksen määrän kasvaessa molemmilla massoilla, mikä on vastoin teoriaa. Tulokseen vaikuttanee arkkimuotissa vallitsevat olosuhteet, jotka ovat mm. leikkausvoimiltaan kertaluokkaa erilaiset kuin paperikoneella. Koivuarkkien kuivauskutistuman todettiin olevan herkkä jauhatuksen määrälle. Jo pienillä jauhatusenergian määrillä koivun kuivauskutistuma kasvaa suhteellisen jyrkästi. Männyllä kuivauskutistuman voitiin todeta jauhatuksen alussa hieman pienenevän, minkä jälkeen se kääntyy kasvuun. Tällaisesta männyn kuivauskutistuman käyttäytymisestä on raportoitu myös kirjallisuudessa.

Ilmanläpäisyvastuksen kehittyminen jauhatuksen alussa oli molemmilla massoilla hidasta, mutta jauhatuksen edistyessä varsinkin koivun ilmanläpäisyvastuksen kasvu jyrkkenee. Arkkien lujuudet kehittyvät molemmilla massoilla teorian mukaan. Männyn repäisylujuus saavutti suurimman arvonsa jo pienen jauhatuksen jälkeen ja vetolujuus parani tasaisesti jauhatuksen edetessä.

Optiset ominaisuudet puolestaan heikkenivät lineaarisesti jauhatuksen määrän kasvaessa. Koivulla opasiteetin ja valonsirontakertoimen heikkeneminen oli suhteessa nopeampaa. Vaaleudessa oli molemmilla massoilla verraten suuret heitot eri näytesarjojen välillä, mikä on selitettävissä massojen erilaisilla lähtövaaleuksilla.

Kartoituskoeajoilla saavutettiin niille asetetut tavoitteet. Tulosten perusteella saadaan hyvä käsitys massojen jauhautuvuudesta ja toistettavuudesta tehtaalla käytetyillä terityksillä. Kartoituskoeajojen voidaankin todeta edustavan hyvin normaalia jauhatustilannetta, ja niiden tuloksia voidaan pitää tulevien koeajojen referenssinä.

12. SAKEUSKOEAJO

12.1 Tavoite ja toteutus

Sakeuskoeajon tavoitteena oli selvittää tehdasmittakaavassa jauhatussakeuden merkitys koivu- ja mäntysellun jauhautumisessa. Koeajossa tutkittiin neljän eri jauhatussakeuden merkitys massan jauhautumiseen. Männyn tavoite sakeuksina käytettiin 3,0 %, 3,5 %, 4,0 % ja 4,5 %:a. Koivun sakeustavoitteet olivat 0,5 % korkeammalla, koska teorian mukaan koivu voidaan jauhaa mäntyä korkeammassa sakeudessa. Koivun tavoitesakeudet olivat siis 3,5 %, 4,0 %, 4,5 % ja 5,0 %:a.

Sakeuskoeajon aikana jauhimien jauhatustavat ja -määrät vakioitiin. Tästä seurasi, ettei jauhimien kuluttamiin nettotehoihin puututtu koeajon aikana (mänty 370 kW/jauhin ja koivu 380 kW/jauhin). Jauhatuksen määrän (kokonais-EOK:n) vakioiminen (mänty 160 kWh/t ja koivu 70 kWh/t) edellytti tehon vakioimisen lisäksi samaa kuiva-aine virtaamaa (kg/s) jauhimien läpi kaikissa koepisteissä. Sakeuden muuttuessa tämä edellytti tilavuusvirran (l/min) säätämistä tarpeen mukaan. Jauhatussakeudet säädettiin tavoitteisiinsa lisäämällä tai vähentämällä annostelusäiliöiden jälkeistä sakeuden säätövettä.

Näytteet otettiin sakeuden ollessa tavoitteessaan. Näytteenottopaikka oli mäntylinjalla kolmannen jauhatusvaiheen jälkeen ja koivulinja 2:lla toisen jauhatusvaiheen jälkeen. Näytteistä määritettiin laboratoriossa sakeus ja massamääritykset. Valmistetuista paperiarkeista määritettiin paperitekniset perusominaisuudet.

12.2 Tulokset ja johtopäätökset

Sakeuskoeajo suoritettiin 11.5.1995. Männyn tulokset ovat keskenään vertailukelpoiset, mutta niitä ei voida verrata aikaisempiin tuloksiin, koska sakeuskoeajon aikana käytetty mäntymassa oli osittain paalimassaa (kap. 90 % kuivattu). Sakeuskoeajojen tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 4.

12.2.1 Männyn jauhatussakeus

Taulukossa 8 on esitetty männyn jauhatussakeuskoeajon keskeisemmät tulokset. Teorian mukaan jauhatussakeutta laskettaessa jauhimen teräväli pienenee, ja jauhatus

muuttuu rajummaksi. Sakeuskoeajon tulosten perusteella männyn keskikuidunpituus ei kuitenkaan muutu, kun jauhatussakeus vaihtelee 3,4 - 4,7 %:n välillä. Alhaisimmalla sakeudella saavutetaan lisäksi suurin repäisyindeksi.

Taulukko 8. Jauhatussakeuden vaikutus männyn jauhautuvuuteen ja paperitekniisiin ominaisuuksiin, kun jauhatustapa ja -määrä ovat vakiot. (teritys BB - AA - BB)

TAVOITE SAKEUS	3,0 %	3,5 %	4,0 %	4,5 %
Kuiva-aine, %	3,4	3,8	4,2	4,7
Freeness, ml	580	585	580	570
Keskikuitupituus, mm	2,08	2,07	2,08	2,08
Tiheys, kg/m ³	543	546	548	559
Kuivauskutistuma, %	3,6	3,5	3,5	3,9
Gurley, s/100ml	3,8	4,1	4,5	7,2
Vetoindeksi, Nm/g	58	59	60	62
Puhkaisuindeksi, kPam ² /g	5,1	5,1	5,2	5,5
Repäisyindeksi, mNm ² /g	16,1	16,1	16,0	15,7
Lujuustulo, Vi*Ri	936	950	963	969
Jauhatusarkin vaaleus, %	86,7	86,6	86,5	86,3
Opasiteetti, %	71,3	70,9	71,4	70,5
Valonsirontakerroin, m ² /kg	27,1	26,9	27,1	26,8

Tuloksista on todettavissa, että männyn jauhatussakeuden nostaminen lisää lievästi massan jauhautuneisuutta kaikilla massasta määritetyillä mittauksilla. Jauhatussakeuden kasvaessa paperiarkin rakenne tiivistyy (ilmaläpäisyvastus ja tiheys kasvavat) ja lujuudet paranevat, lukuunottamatta repäisylujuutta. Kuivauskutistuma pienee aluksi, mutta kääntyy kasvuun jauhatussakeuden noustessa yli 4,2 %:iin. Optisista ominaisuuksista vaaleus pienenee sakeuden kasvaessa, mutta opasiteetti ja valonsirontakerroin saavuttavat suurimmat arvonsa tutkitulla alueella 4,2 %:ssa.

12.2.2 Koivun jauhatussakeus

Koivun jauhatussakeuskoeajon tulokset on esitetty taulukossa 9. Tulosten perusteella koivu on erittäin herkkä jauhatussakeuden muutoksille. Tutkitulla sakeusalueella jauhatussakeuden nosto lisäsi massan jauhautuneisuutta freeneksellä mitattuna 75 ml. Myös arkeista mitattujen paperitekniisten ominaisuuksien perusteella voidaan selvästi havaita jauhautuneisuuden lisääntyminen sakeuden kasvaessa. Paperin rakenne tiivistyy (ilmanläpäisyvastus kasvaa voimakkaasti) ja lujuudet paranevat. Optisista

ominaisuuksista todetaan, ettei vaaleudelle tapahdu mitään ja opasiteetti heikkenee sakeuden kasvaessa. Kuivauskutistuma kasvaa jatkuvasti sakeuden kasvaessa.

Taulukko 9. Jauhatussakeuden vaikutus koivun jauhautuvuuteen ja paperitekniisiin ominaisuuksiin, kun jauhatustapa ja -määrä ovat vakiot. (teritys AA - MX)

TAVOITE SAKEUS	3,5 %	4,0 %	4,5 %	5,0 %
Kuiva-aine, %	3,8	4,0	4,5	4,7
Freeness, ml	510	490	450	435
Keskikuitupituus, mm	1,00	1,00	0,99	0,98
Tiheys, kg/m ³	578	576	593	603
Kuivauskutistuma, %	3,3	3,5	3,7	4,0
Gurley, s/100ml	4,8	5,0	7,4	10,2
Vetoindeksi, Nm/g	66	68	72	73
Puhkaisuindeksi, kPam ² /g	4,8	4,8	5,2	5,4
Repäisyindeksi, mNm ² /g	8,9	9,1	8,9	9,0
Lujuustulo, Vi*Ri	591	617	640	654
Jauhatusarkin vaaleus, %	87,5	87,5	87,6	87,8
Opasiteetti, %	75,4	75,3	74,2	73,8
Valonsirontakerroin, m ² /kg	32,1	32,2	30,8	30,8

12.3 Yhteenveto

Sakeuden vaikutus molempien massojen jauhautuvuuteen oli teorian mukainen (jauhatustapa ja -määrä vakiot). Sekä koivu- että mäntymassalla jauhatussakeuden nostaminen lisäsi massan jauhautuneisuutta. Koivulla jauhatussakeuden merkitys kokeessa tutkitulla sakeusalueella oli merkittävästi suurempi kuin männyllä.

Tuloksen perusteella männyn optimaalinen jauhatussakeus käytetyllä karkealla ja kuluneella terityksellä on mahdollisimman korkea, koska lähes kaikki ominaisuudet kehittivät vielä 4,7 %:n sakeudessakin. Kopiopaperin tärkeiden tilasuureiden kannalta suurissa sakeuksissa rajoittavaksi tekijäksi muodostuu kuivauskutistuman voimakas kasvu, mutta massan prosessoitavuus voi aiheuttaa myös ongelmia. Käytännössä optimaalinen jauhatussakeus kopiopaperille tehtaalla käytössä olevalla terityksellä on 4,1 - 4,3 %:n välillä.

Koivu tulisi jauhaa mahdollisimman korkeassa sakeudessa silloin, kun paperin ilmanläpäisyvastuksen halutaan kehittyvän voimakkaasti. Negatiivisesti korkea

jauhatussakeus vaikuttaa kopiopaperin kuivauskutistumaan ja opasiteettiin. Kuivauskutistuman kasvamisesta huolimatta, optimaalinen jauhatussakeus kopiopaperin koivu-komponentille on suotautumisvastuksen ja paperin ominaisuuksien kehittymisen kannalta (lähinnä ilmankäpäisyvastus) 4,5 - 4,7 %:n välillä. Mikäli ainoana kriteerinä on kuivauskutistuman minimoiminen, niin silloin jauhatus tulee tehdä alhaisessa 3,8 %:n sakeudessa.

Sakeuskoeajon perusteella voidaan jauhatussakeutta pitää merkittävänä muuttujana hallittaessa jauhatusta. Näin ollen sakeus tulisikin vakioida tietylle tasolle, mikä tulosten perusteella on molemmille massoille korkeampi kuin diplomityötä aloitettaessa. Sakeuskoeajon tulosten perusteella on helposti ymmärrettävissä, että vaihtelut jauhatussakeuksissa aiheuttavat muutoksia paperikoneen toiminnassa ja vaikuttavat lopputuotteen laatuun.

13. Ca^{2+} -IONIPITOISUUDEN SELVITYS

13.1 Tavoite ja toteutus

Tämän koeajon tavoitteena oli selvittää Ca^{2+} -ionipitoisuus jauhatuksessa ja sen muutokset sellutehtaan ja PK 9:n välillä. Lisäksi haluttiin selvittää irtoaako kuidun pinnan rikkoutuessa jauhatuksessa valkaisusta peräisin olevaa happamuutta. Selvityksessä tutkittiin vapaiden Ca^{2+} -ionien pitoisuudet ja pH:n muutokset mänty- ja koivulinjalla siirtäessä sellutehtaalta PK 9:n sekoitussäiliöön.

Tavoitteen toteuttamiseksi koivulinjalta ja männyn putki- ja paalilinjoilta otettiin kahdet näytesarjat (A ja B). Näytteiden otossa käytettiin periaatetta, että näyte otettiin, kun putkessa virtaavan aineen sakeus tai massakoostumus muuttui. Näytesarjasta A otettiin näytteet lisäksi jauhatusvaiheiden välistä. Näytesarjasta B otettiin ylimääräiset näytteet koivu- ja mäntymassan haku- sekä 0-vesistä, koska A-näytteiden perusteella vaikutti, että 0-vesisäiliön vesi olisi Ca^{2+} -ionipitoisuudeltaan väkevämpää kuin 0-vesitornin vesi.

13.2 Tulokset ja johtopäätökset

A-näytteiden otto suoritettiin 22.2.1995 ja B-näytteiden 12.5.1995. Tulokset ja näytteenottopaikat on esitetty alla taulukoissa 10, 11 ja 12. Näytteenottopaikkojen sijainti selviää luvussa 10.1 esitetystä kuvasta 8.

Sellutornista lähtevät massat laimennetaan paperitehtaan saostimilta (koivu, mänty ja paalimänty) kerätyllä suodosvedellä n. 2 - 3 %:iin, jonka jälkeen mäntymassan pH oli keskimäärin noin 3,5 ja Ca^{2+} -ionipitoisuus on noin 10,0 mg/l. Taulukosta 10 voidaan havaita, ettei A-näytteen vapaan Ca^{2+} -ionipitoisuus nouse merkittävästi silloin, kun sakeuden säätöön käytetään 0-vesitornin vettä. pH sen sijaan nousee laimennuksissa. Suuremmat muutokset Ca^{2+} -ionipitoisuuteen syntyvät vasta, kun annostelusäiliön jälkeen jauhatussakeus säädetään 0-vesisäiliön vedellä. B-näytteellä Ca^{2+} -ionipitoisuus puolestaan nousee jo, kun massa laimennetaan 0-vesitornin vedellä.

Taulukko 10. PK 9:n mäntymassan pH:n ja vapaan Ca^{2+} -ionipitoisuudet.

Näytteenotto paikka	A pH	B pH	A Ca^{2+} , mg/l	B Ca^{2+} , mg/l	Sakeudensäättövesi
Sellutehtaalta lähtevä	3,5	3,3	9	11	hakuvesisäiliö
Varastotornin jälkeen	5,7	6,6	9	39	0-vesitorni
Kuivauskone	3,5	-	6	-	-
Paalimassa varastot. jälk.	5,7	6,8	10	51	0-vesitorni
Paalimassan varastos. jälk.	5,9	6,9	16	53	0-vesitorni
Annostelusäiliön jälk.	7,1	7,2	47	63	0-vesisäiliö
1. jauhatuvaiheen jälk.	7,1	-	47	-	-
2. jauhatuvaiheen jälk.	7,1	-	48	-	-
3. jauhatuvaiheen jälk.	7,1	7,3	46	65	-

Koivulla tilanne on vastaavanlainen, kuten taulukosta 11 voidaan todeta. 0-vesitornin laimennusvesi ei nosta A-näytteen Ca^{2+} -ionipitoisuutta, mutta kylläkin pH:ta. B-näytteellä Ca^{2+} -ionipitoisuus kasvaa jo varastotornin jälkeisessä laimennuksessa.

Taulukko 11. PK 9:n koivumassan pH:n ja vapaan Ca^{2+} -ionipitoisuudet.

Näytteenotto paikka	A pH	B pH	A Ca^{2+} , mg/l	B Ca^{2+} , mg/l	Sakeudensäättövesi
Sellutehtaalta lähtevä	4,5	3,6	3	8	Hakuvesisäiliö
Varastotornin jälk.	5,8	6,4	4	22	0-vesitorni
Annostelusäiliön jälk.	6,4	6,9	16	40	0-vesisäiliö
1. jauhatuvaiheen jälk.	6,5	-	15	-	-
1. jauhatuvaiheen jälk.	6,7	-	16	-	-
2. jauhatuvaiheen jälk.	6,5	6,8	16	49	-

Taulukon 10 ja 11 tulosten perusteella voidaan todeta, ettei kuidun pinnan rikkoutuessa jauhatuksessa vapaudu sellutehtaalta peräisin olevaa happamuutta. Johtopäätös voidaan tehdä, koska

- pH ei muutu jauhatuvaiheiden välillä eikä
- vapaa Ca^{2+} -ionipitoisuus ei kasva, (jos jauhatuksessa vapautuisi happamuutta, niin kalsiumkarbonaatti liukenesi ja vapaa Ca^{2+} -ionipitoisuus kasvaisi).

Taulukossa 12 on esitetty männyn ja koivun hakuveden pH ja Ca^{2+} -ionipitoisuus, kun ne lähtevät paperitehtaalta. Sellutehtaalla hakuvedet kerätään yhteen säiliöön. Sellutehtaalta lähtevän massan pH ja Ca^{2+} -ionipitoisuus voidaan selittää hakuveden pH:lla ja Ca^{2+} -ionipitoisuuksilla.

0-vesisäiliön ja -tornin vedet ovat B-näytteillä pH ja Ca^{2+} -ionipitoisuuksiltaan identtisiä (taulukko 12). Epäselväksi jää, miksi A-näytteitä otettaessa 0-vesitornin veden käyttö sakeudensäätöön ei nostanut Ca^{2+} -ionipitoisuutta, mutta kuitenkin kasvatti pH:ta, tosin vähemmän kuin B-näytteellä. Eräs syy saatta olla, näytteiden A ja B otto ajankohdassa. B-näytteet otettiin vain 1,5 viikkoa vappuseisokin jälkeen ja A-näytteet otettiin 22.2.1995, jolloin prosessi oli ollut toiminnassa useita viikkoja.

Taulukko 12. PK 9:n sellun hakuvesien ja sakeuden säätövesien pH:n ja vapaan Ca^{2+} -ionipitoisuudet.

Näytteenotto paikka	B pH	B Ca^{2+} , mg/l
Männyn hakuvesi	3,3	11
Koivun hakuvesi	3,6	7
0-vesisäiliön vesi	7,4	55
0-vesitornin vesi	7,4	55

13.3 Yhteenvedo

Kirjallisuusosassa todettiin kuitujen jauhautuvan pienimmällä energian kulutuksella neutraalissa tai lievästi alkalisessa ympäristössä. Tulosten perusteella voidaan koivun jauhatuksen pH:n hieman alle 7,0 ja männyn vähän yli 7,0 todeta olevan oikealla alueella. Jauhatuksen edetessä ei kuidusta myöskään irronnut happamutta, koska pH ei laskenut eikä Ca^{2+} -ionipitoisuus noussut.

Teorian mukaan moniarvoiset ionit hidastavat massan jauhautumista ja vaikutus voimistuu ionin valenssiluvun kasvaessa. Valkaistuilla massoilla vaikutuksen todettiin tosin olevan kaikkein vähäisintä /74/. Männyn Ca^{2+} -ionipitoisuudet vaihtelevat jauhatuksessa 47 - 63 mg/l välillä ja koivulla 15 - 49 mg/l välillä. Viitteessä /71/ oli todettu 80 - 100 mg/l Ca^{2+} -ionipitoisuuden hidastavan massan vetoindeksin kehittymistä, alentavan saavutettavaa vaaleutta ja saostavan massaansa liuenneita aineita sekä kiertoveden epäpuhtauksia. Tämän perusteella voidaan PK 9:n jauhatuksessa vaikuttavan Ca^{2+} -ionipitoisuuden todeta hidastavan massan jauhautumista. Sen selvittämiseksi kuinka paljon Ca^{2+} -ionipitoisuus vaikuttaa PK 9:n jauhatuksessa, tulisi suorittaa lisätutkimuksia.

14. PILOTKOEAJO

14.1 Tavoite

Koeajon tavoitteena oli selvittää pilot-mittakaavassa erilaisten terägeometrioiden merkitys koivu- ja mäntymassan jauhautumiseen. Lisäksi pyrittiin selvittämään männyn kuivatushistorian vaikutus paperin ominaisuuksiin sekä koivu- ja mäntymassan jauhatusmäärän tarvetta kopiopaperissa.

14.2 Koesuunnitelma

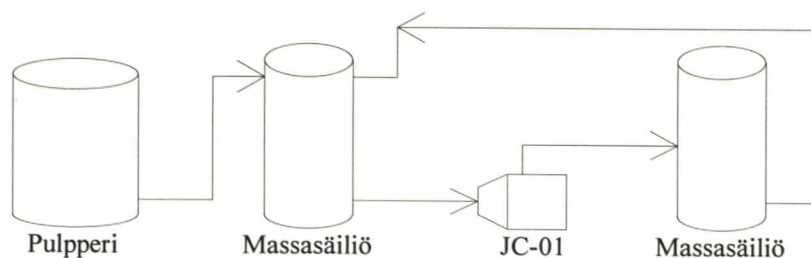
Pilotjauhatuksia varten valittiin kuivatushistorialtaan kolmenlaista mäntymassaa ja yhtä koivumassaa. Pilotjauhatuksissa käytetyt massat ja näytteenottopaikat on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Pilotkoeajossa käytetyt massat ja näytteenottopaikat.

Massa		Kuivatushistoria	Näytteenottopaikka
MÄNTY	Putki	kuivaamaton	Mäntytornin jälkeen
	Puolikuiva	kuivaamaton / kap. 80%	Annostelusäiliö
	Paali	kuivattu kap. 90%	Paalimassavarasto
KOIVU	Putki	kuivaamaton	Annostelusäiliö

Kuivaamattomat ja puolikuivamassa otettiin normaalista ajotilanteesta, ja ne toimitettiin jauhatussakeudessa tankkiautolla Kuusankoskelta Sunds Defibrator Jylhä Oy:n jauhinkoeasemalle Valkeakoskelle. Paalimassana käytettiin Kuusanniemessä valmistettua kap. 90 %:iin paalattua ECF-massaa. Kaikki pilotjauhatuksissa käytetyt massat testattiin ennen koejauhatuksia PFI-jauhatuksella niiden laadun toteamiseksi. Liitteessä 5 on esitetty koemassojen PFI-jauhatuksen tulokset.

Jauhatuskoeajot suoritettiin Sunds Defibrator Jylhä Oy:n jauhinkoeasemalla Valkeakoskella. Massat jauhettiin tehdasmittakaavaisella Jylhä Conflo JC-01 kartiojauhimella. JC-01 jauhin on vastaavanlainen, mutta kaksi kokoluokkaa pienempi kuin tehtaalla käytössä olevat Jylhä Conflo JC-03 jauhimet. Pilotjauhatuslaitteisto on esitetty yksinkertaistetusti kuvassa 9.



Kuva 9. Pilotjauhatuksen laitteisto.

Pilotjauhaukset pyrittiin suorittamaan samanlaisissa olosuhteissa kuin tehtaalla vallitse. Jauhinten pyörimisnopeudet, tehot, läpivirtaukset jne. säädettiin vastaamaan tehdasolosuhteita, myös paalimassan pH säädettiin NaOH:lla samalle tasolle kuin tehtaalla on. Pilotkoeajon toteutunut koesuunnitelma on esitetty liitteessä 6. Liitteestä selviää myös koeajossa käytetyt terämallit, toteutuneet jauhatusolosuhteet sekä ajoparametrit. Taulukoon 14 on kerätty pilotkoeajossa käytettyjen terämallien hammasdimensiot.

Taulukko 14. Pilotkoeajossa käytetyt terämallit ja hammasdimensiot.

Terämalli	Jauhettava massa	Hammas, mm	Ura, mm
LM	Mänty	4,5	6,0
TM	"	3,0	7,0
MX (=FF)	Koivu	3,5	4,5
SC	"	3,0	4,0

Kaikista jauhatussarjoista (1 - 6) valmistettiin yhtä massakomponenttia sisältävät standardilaboratorioarkit, joiden tulokset on esitetty liitteessä 7. Näiden tulosten perusteella valittiin jauhatussarjat, joista valmistettiin kopiopaperimassakoostumuksen sisältävät arkit eri jauhatusmäärien yhdistelmällä. Nämä tulokset on esitetty liitteessä 8.

Pilotjauhettujen kopiopaperiarkkien referenssiksi valmistettiin tehdasjauhetuista massoista massakoostumukseltaan samanlaiset seosarkit. Tehdasjauhetuun kopiopaperimassaseokseen valittiin mäntymassaksi kartoituskoeajossa A ja koivumassaksi kartoituskoeajossa B jauhetut massat (koivulinja 2). Kyseiset massat valittiin, koska niillä saatiin katettua laajin jauhatusalue.

Pilotjauhetuista massoista (liite 6) valittiin mäntymassoiksi jauhatussarjat 2 (putki) ja 3 (puolikuiva). Tämän lisäksi valmistettiin jauhatussarjan 4 kolmannen vaiheen (katkova teritys) mäntymassasta sarja kolmella eri koivun jauhatusmäärällä. Koivumassana käytettiin kaikille pilotjauhetuille massoille jauhatussarjan 6 SC-terityksellä jauhettua

koivumassaa. Kopiopaperiarkeissa käytetty hylky oli kaikissa koepisteissä PK 9:n märkähylkyä. Taulukossa 15 on esitetty kopiopaperiarkeissa käytetyt massat, niiden annostelu ja jauhimien teritys.

Taulukko 15. Kopiopaperimassakoostumuksen sisältävien arkkien massan annostelu.

KP	Massat		Teritys		Annostelu kuidusta, %		
	Mänty	Koivu	Mänty	Koivu	Mänty	Koivu	Hylky
Tehdas	A	B	BB-AA-BB	AA-MX	25	58	17
Putki	2	6	LM-LM-LM	SC-SC	25	58	17
Seos	3	6	LM-LM-LM	SC-SC	25	58	17
Katkova	3	6	LM-LM-TM	SC-SC	25	58	17

14.3 Tulosten tulkitseminen

Tuloksia tarkastellaan yhden massakomponentin ominaisuuksien muuttumista jauhatuksen määrän funktiona ja verrataan näin saatuja tuloksia kartoituskoeajoista saatuihin tuloksiin. Tämän lisäksi valmistettiin kopiopaperimassa-arkit (mukaan ei otettu jauhamattomia pisteitä) siten, että niistä voitiin laatia kahden selittävän muuttujan regressiomallit. Selittävät muuttujat ovat koivun ja männyn jauhatuksen määrät.

Muodostetut regressiomallit ovat muotoa

$$y = a + b \times x_1 + c \times x_2 + d \times x_1x_2 + e \times x_1^2 + f \times x_2^2$$

(15)

- missä y
- =
- tuotteen tilasuure
- x₁
- =
- koivun jauhatuksen määrä, kWh/t
- x₂
- =
- männyn jauhatuksen määrä, kWh/t
- a..f
- =
- vakioita

Mallien muodostamisessa käytettiin periaatetta, että ensimmäisen asteen termit pakotettiin malliin ja muut termit otettiin mukaan, jos niiden merkitsevyystaso oli suurempi kuin 90 %. Muodostetut regressiomallit on esitetty liitteessä 9.

Alkuperäisenä tarkoituksena oli laatia sama-arvokäyrästäjä muodostettujen regressiomallien avulla, mutta mallien osoittauduttua lähes lineaarisiksi luovuttiin sama-arvokäyrästäjien piirtämisestä. Mallien avulla päädyttiin laatimaan käyrästäjä, joissa

y-akselilla on tuotteen tutkittu tilasuure ja x-akselilla koivun jauhatuksen määrä. Koivun jauhatuksen määrä valittiin x-akselille, koska se käyttäytyy selittävistä muuttujista lineaarisemmin. Männyn jauhatuksen määrä esitetään parametrinä. Regressiomalleilla piirrettyjä käyrästäjä kopiopaperin tärkeistä ominaisuuksista on esitetty liitteessä 10.

14.4 Tulokset ja johtopäätökset

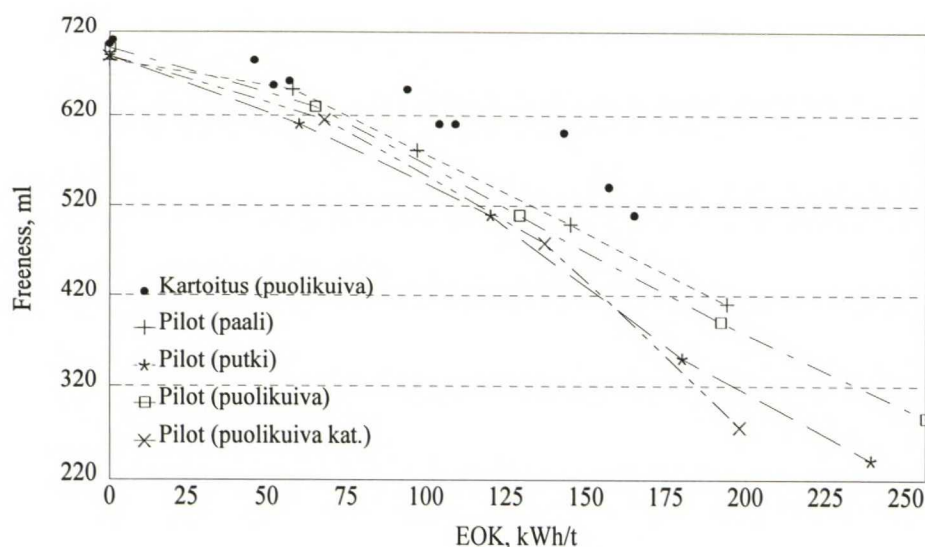
Pilotkoeajo suoritettiin ajalla 7 - 9.3.1995. Koeajon ongelmaksi muodostui, ettei tankkiautolla toimitettuja märkeä massoja saatu purettua tavoitteena olleissa sakeuksissa (koivu 4,5 % ja mänty 4,0 %). Märkien mäntymassojen lopulliseksi jauhatussakeuksiksi saatiin noin 3,0 % (paalimassa 4,1 %) ja koivumassan 4,0 %. Tämän seurauksena tavoitteena olleet EOK:n määrät nousivat ja jauhatustapa muuttui rajummaksi.

Keskeisimmistä kokeen tuloksista on piirretty kuvaajat, joissa massan tai arkin ominaisuuden kehittyminen on esitetty energianominaiskulutuksen funktiona. Kuviin on lisätty tehdasjauhimita saadut kartoituskoeajon tulokset, joissa massoina olivat puolikuiva mänty ja putkikoivu.

14.4.1 Mäntymassan jauhatus

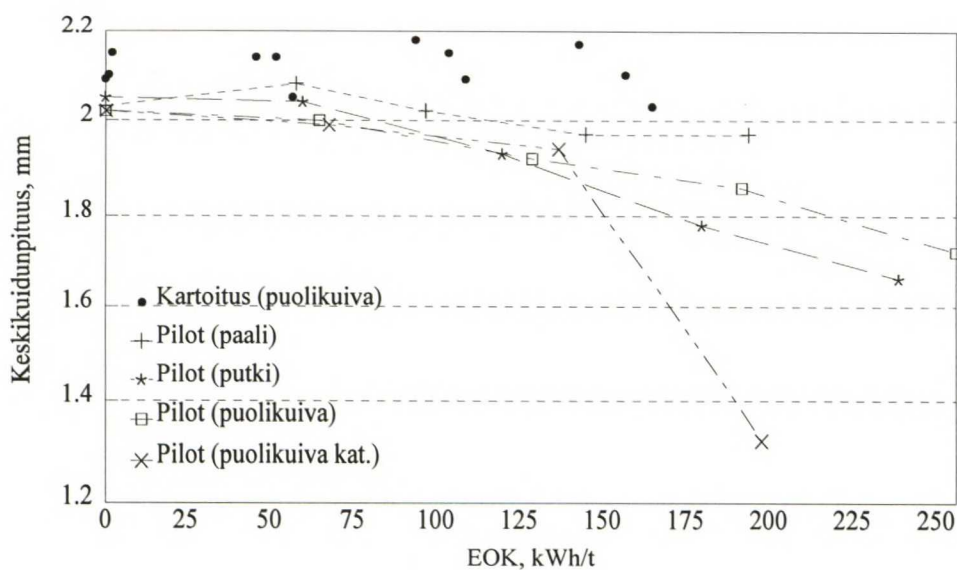
Kuvassa 10 on esitetty männyn freeneksen kehittyminen EOK:n funktiona. Kuvasta voidaan todeta, että kaikilla pilotjauhetuilla massoilla, kuivatushistoriasta riippumatta, freeness kehittyy merkittävästi nopeammin kuin tehtaalla kartoituskoeajossa. Katkovi-
en terien käytöllä puolikuivan mäntymassan kolmannessa jauhatusvaiheessa todetaan freeneksen kehittymisen nopeutuvan.

Erot pilotjauhattujen massojen kuivatushistorioissa tulevat esille vasta pidemmälle jauhettaessa. Ero freeneksen kehittämisessä kartoitus- ja pilotjauhatuksen välillä johtunee pääasiassa terityksestä, tosin sellun laadulla voi olla oma merkityksensä. Huonoon jauhautumiseen tehtaalla on käytännössä kaksi mahdollista terityksestä johtuvaa syytä, terät ovat kuluneet ja/tai terägeometrit ovat vääränlaiset.



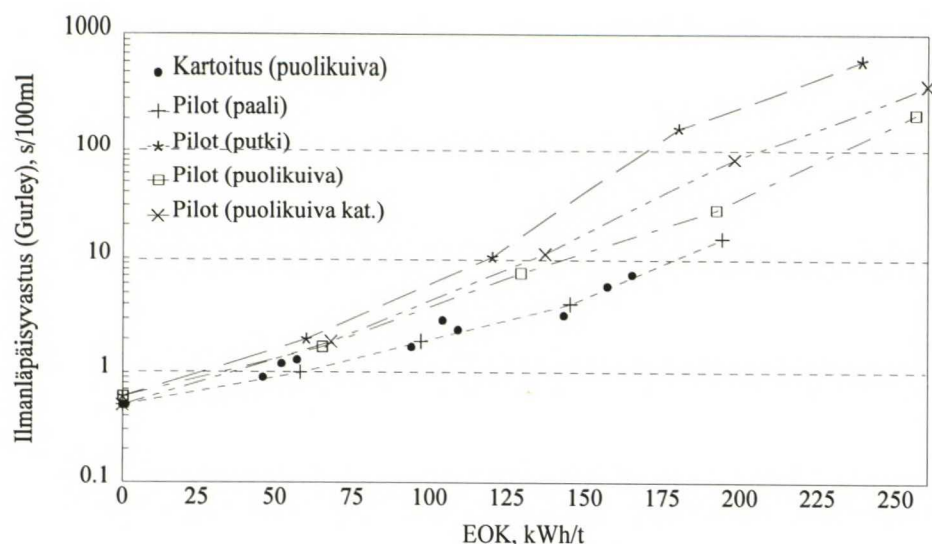
Kuva 10. Kuivatushistorialtaan erilaisten mäntymassojen freeneksen kehittyminen EOK:n funktiona kartoitus- ja pilotjauhatuksessa.

Pilotjauhettujen massojen keskikuidunpituudessa (kuvassa 11) voidaan todeta laskeva trendi kuivatushistoriasta riippumatta. Tulos on huomionarvoinen, koska kartoituskoeajoss ei ollut havaittavissa keskikuidunpituuden laskua. Kopiopaperin formaation kannalta on edullista kuitujen lievä katkominen massan formaatiopotentiaalin parantamiseksi. Katkovan jauhatusvaiheen todetaan lyhentävän voimakkaasti keskikuidunpituutta. Lähtötasoero jauhamattomien massojen keskikuidunpituudessa kartoitus- ja pilotkoeajossa johtunee mittalaitteen kalibroinnista.



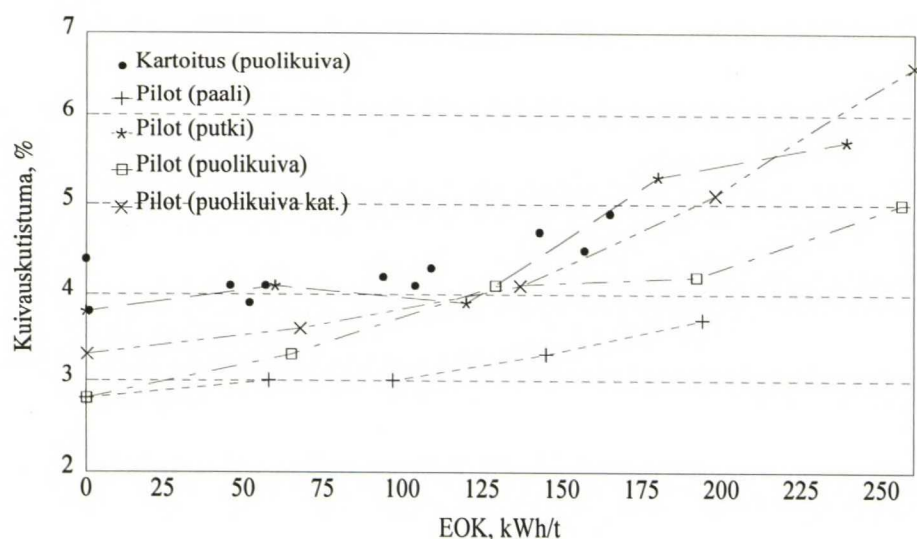
Kuva 11. Kuivatushistorialtaan erilaisten mäntymassojen keskikuidunpituuden kehittyminen EOK:n funktiona kartoitus- ja pilotjauhatuksessa.

Kuvassa 12 on esitetty logaritmisella asteikolla ilmanläpäisyvastus EOK:n funktiona. Kuvasta todetaan, että paalimassasta valmistetun arkin rakenteesta tulee avonaisin. Rakenne tiivistyy siirryttäessä paalimassasta puolikuivaan massaan ja edelleen putkimassaan. Katkova jauhatus tiivistää mäntyarkkia. Kuvasta 12 voidaan edelleen todeta ilmanläpäisyvastuksen kehittyvän kartoitusjauhatuksissa yhtä hitaasti kuin pilotjauhatuksissa paalimassalla. Kopiopaperin kannalta on ilmanläpäisyvastuksen kehittyminen putkimassalla edullisinta.



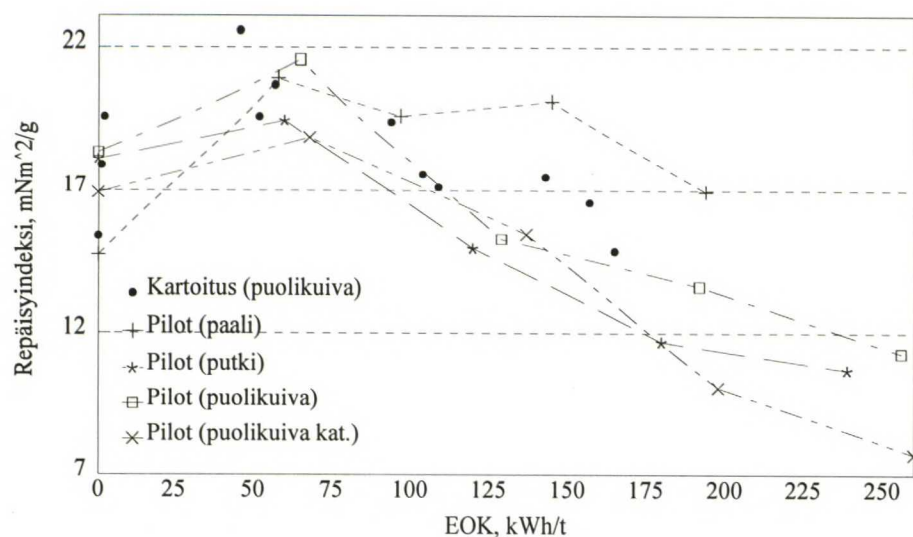
Kuva 12. Kuivatushistorialtaan erilaisten mäntyarkkien ilmanläpäisyvastus (Gurley) logaritmisella asteikolla EOK:n funktiona kartoitus- ja pilotjauhatuksissa.

Kuivauskutistuma on paalimassalla selvästi pienin ja kutistuma kasvaa kuivatun massajakeen osuuden pienentyessä, kuten kuvasta 13 voidaan todeta. Pilotjauhatuksessa saadaan putkimassalle likimain samanlainen kuivauskutistuma kuin kartoitusjauhatuksessa jauhetulle puolikuivalle massalle. Pilotjauhetulla puolikuivalla massalla saadaan puolestaan selvästi pienempi kuivauskutistuma (0,5 - 1,0 %-yksikköä) kuin vastaava massa tehtaalla jauhettuna. Katkova jauhatusvaihe lisää massan kuivauskutistumaa.



Kuva 13. Kuivatushistorialtaan erilaisten mäntyarkkien kuivauskutistuma EOK:n funktiona kartoitus- ja pilotjauhatuksissa.

Männyn vetoindeksi kehittyi putkimassalla nopeimmin ja paalimassalla hitaimmin jauhatuksen edistyessä. Paalimassan vetoindeksin lähtötaso on myös selvästi alhaisempi. Repäisyindeksillä mitattuna putkimassa ja puolikuivamassa saavuttivat suurimman arvonsa jo pienen (50 kWh/t) jauhatusmäärän jälkeen, kuten kuvasta 14 voidaan todeta. Paalimassalla optimialue on varsin laaja ja vasta suhteellisen pitkälle jauhettaessa repäisylujuus kääntyy laskuun.



Kuva 14. Kuivatushistorialtaan erilaisten mäntyarkkien repäisyindeksi EOK:n funktiona kartoitus- ja pilotjauhatuksissa.

Erot puolikuivan ja putkimassan välillä ovat pienet niin veto- kuin repäisyindeksissä. Putkimassalla saadaan samassa jauhatuksen määrässä vetoindeksillä mitattuna hiukan

lujempaa massaa kuin puolikuivalla, mutta repäisyindeksillä mitattuna tilanne on päinvastoin. Lujuustulon kehittyminen EOK:n funktiona on molemmilla massoilla samanlaista. Katkova jauhatusta heikentää lujuuksia, etenkin repäisylujuutta, mutta venymään sillä ei ole merkitystä.

Optiset ominaisuudet heikkenevät lähes lineaarisesti kaikilla massoilla jauhatusmäärän funktiona. Putkimassan osuuden lisääminen heikentää opasiteetin ja valonsirontakerroimen lähtötasoa. Katkovalla jauhatuksella ei ole havaittavaa lisävaikutusta optisiin ominaisuuksiin. Kartoituskokeessa jauhettujen massojen optiset ominaisuudet kehittyvät samalla tavalla jauhatuksen määrän funktiona kuin kuivatushistorialtaan vastaava pilotjauhatuksessa jauhettu massa, joten jauhimien terityksillä ei ole vaikutusta paperin optisiin ominaisuuksiin. Ainoastaan jauhatuksen määrä ja massan kuivatushistoria vaikuttavat optisiin ominaisuuksiin.

Taulukkoon 16 on kerätty mäntymassan pilotjauhatusten tulokset freeness-tasossa 520 ml (normaali taso tehtaalla). Taulukossa esitetään myös tehtaalla jauhettujen kolmen kartoituskoeajon keskimääräiset tulokset.

Taulukko 16. Pilot- ja kartoituskoeajossa jauhettut mäntymassat freeness-tasossa 520 ml.

	Pilotjauhatusta			Kartoitus jauhatusta
	Putki	Puolikuiva	Paali	Puolikuiva
EOK, kWh/t	115	125	135	170
Kuidunpituus, mm	1,95	1,92	1,99	2,10
Tiheys, kg/m ³	565	555	510	565
Gurley, s/100ml	8,0	7,0	4,0	8,0
Kuivauskutistuma, %	3,9	4,0	3,2	5,0
Vetoindeksi, Nm/g	67	64	51	67
Repäisyindeksi, mNm ² /g	15,7	16,0	20,0	15,5
Lujuustulo, Vi* <i>Ri</i>	1 030	1 010	1 040	1 030
Opasiteetti, %	71,7	71,8	72,8	72,0
ISO Vaaleus, %	87,1	90,0	88,2	83,5-89,0
Valonsirontakerroin, m ² /kg	27,3	28,0	30,0	26,3

Taulukossa 9 esitetyistä tuloksista voidaan tehdä kaksi johtopäätöstä:

1. Jauhettaessa samanlaista puolikuivaa massaa vakio freeness-tasoon 520 ml on tehtaalla käytettävä noin 45 kWh/t enemmän jauhatusenergiaa kuin pilotasemalla jauhettaessa (vertaa taulukkoon 5).

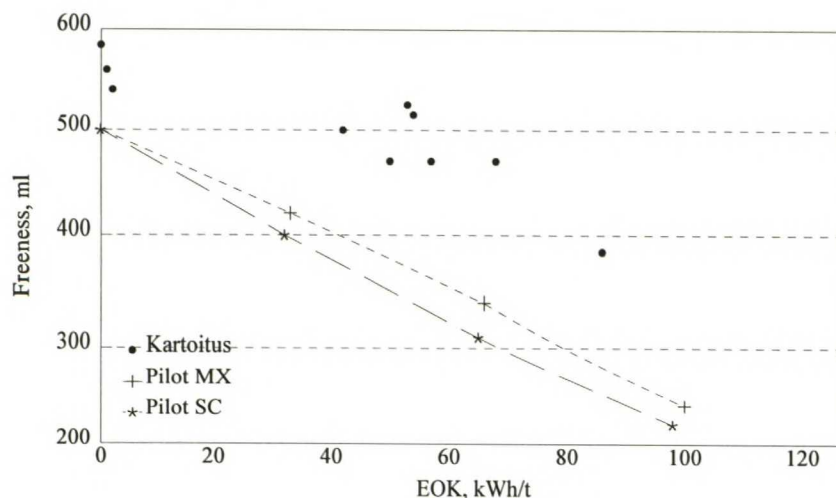
2. Samassa freeness-tasossa ja samanlaisissa jauhatusolosuhteissa pilotjauhetuilla putkimassalla ja puolikuivalla massalla ei ole käytännössä eroa paperiarkin ominaisuuksissa.

Ensimmäisen johtopäätöksen perusteella on mäntylinjan jauhatuskapasiteettia mahdollista lisätä vaihtamalla LM-tyyppiset terät jauhimiin. Jauhatuskapasiteetin lisääntymisen ansiosta voidaan linjalla jauhaa noin 20 - 30 % suurempi kuivamassavirta. Mikäli lisääntynyttä jauhatuskapasiteettia ei tarvita, niin jauhatusenergian kulutuksessa voidaan säästää. Tämä tarkoittaa PK 9:n normaalilla tuotannolla (mäntyä jauhetaan n. 7,5 t/h) ja sähkön maksaessa 0,15 mk/kW lähes 400 000 mk:n säästöä vuodessa.

Toisen johtopäätöksen perusteella vaikuttaa, että kuivauskoneella kap. 80 %:iin kuivaatun massan käytöstä putkimassan seassa (50 % / 50 %) voitaisiin luopua paperiteknisten ominaisuuksien perusteella. Putkimassalla ja puolikuivalla massalla on käytännössä sama paperitekninen potentiaali jauhettaessa ne samaan freeness-tasoon.

14.4.2 Koivumassan jauhatus

Pilotkoeasemalla jauhamattomasta koivumassasta määritetty freeness oli 565 ml eli samalla tasolla kuin kartoituskoeajoissa jauhamattoman koivumassan freenекset. PFI-jauhatuksen tulokset viittasivat kuitenkin, ettei massa olisi samanlaista kuin kerkimäärin (liite 5). Lopullinen selvyys saatiin kuitenkin vasta, kun massamääritykset tehtiin Kuusankosken tutkimuskeskuksessa. Näiden tulosten perusteella todettiin jauhamattoman massan freenекsen olevan selvästi alhaisempi kuin kartoituskokeissa keskimäärin, kuten kuvasta 15 voidaan todeta.



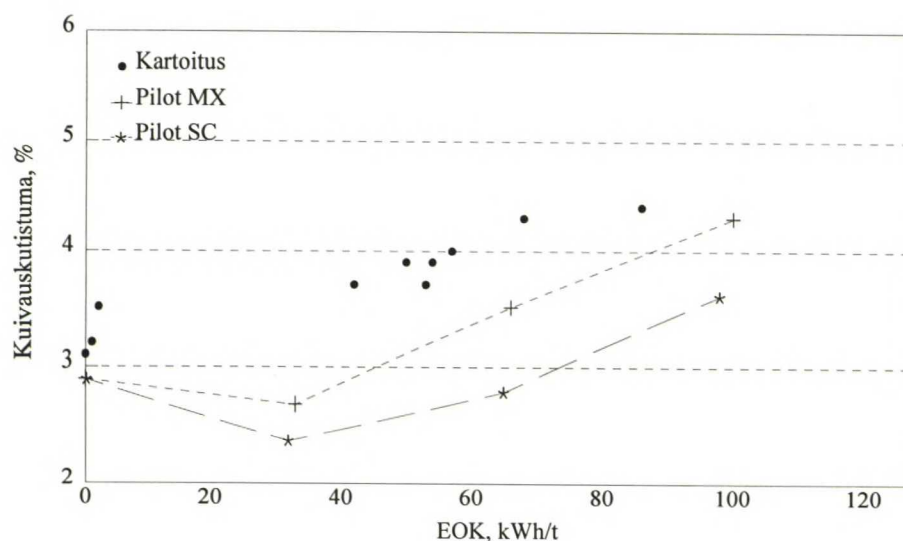
Kuva 15. Koivun freenекsen kehityminen EOK:n funktiona kartoitus- ja pilotjauhatuksissa.

Pilotjauhetut koivumassat ovat kuitenkin keskenään vertailukelpoisia, koska massat on samasta erästä. Tuloksia voidaan verrata varauksella myös kartoituskoeajon tuloksiin, joskin tällöin tulee ottaa huomioon ero lähtötasossa ja verrata vain ominaisuuksien kehittymisnopeutta (kulmakerrointa) EOK:n suhteen.

Taulukossa 17 on vertailtu pilotjauhatuksessa SC- ja MX-terillä jauhattujen koivumassojen ominaisuuksia freeness-tasossa 450 ml. Taulukon perusteella todetaan SC-terien jauhavan tiettyyn freeness-tasoon pienemmällä energian kulutuksella. Kuivauskutistumassa ei ole eroja, mutta ilmanläpäisyvastus kehittyy kopiopaperin kannalta edullisemmin MX-terityksellä. Mikäli ominaisuuksien kehittymistä tarkastellaan EOK:n funktiona massojen suurimpana erona on SC-terillä saavutettava pienempi kuivauskutistuma, joka on todettavissa kuvasta 16.

Taulukko 17. Koivumassa jauhattuna vakio freenekseen 450 ml.

	Pilotjauhatus	
	SC-terät	MX-terät
EOK, kWh/t	15	21
Kuidunpituus, mm	0,99	0,99
Tiheys, kg/m ³	562	580
Gurley, s/100ml	4,0	5,0
Kuivauskutistuma, %	2,7	2,8
Vetoindeksi, Nm/g	60	64
Repäisyindeksi, mNm ² /g	9,1	8,8
Lujuustulo, Vi*Ri	540	560
Opasiteetti, %	74,5	74,0
ISO Vaaleus, %	88,8	88,3
Valonsirontakerroin, m ² /kg	32,5	31,5



Kuva 16. Koivun kuivauskutistuman kehittyminen EOK:n funktiona kartoitus- ja pilotjauhatuksissa.

14.4.3 Kopiopaperimassa

Kirjallisuudessa (luku 8) esitettiin, että koivumassa tulisi jauhaa varovaista ja mäntymassa rajumpaa jauhatustapaa käyttäen optimaalisen jauhatustuloksen saavuttamiseksi. Tämän vuoksi kopiopaperimassaseokseen valittiin SC-terillä (OSK 0,9 J/m) jauhettu koivumassa ja LM-terillä (OSK 4,6 J/m) jauhettu mäntymassa. Oikeasta jauhatusmäärästä kirjallisuudessa esitettiin hyvin ristiriitaisia näkemyksiä. Seuraavassa pyritäänkin selvittämään kopiopaperin tuoremassakomponenttien optimaaliset jauhatusmäärät.

Kopiopaperiarkkien jauhatuksen määrän tarvetta selvitettiin vertaamalla arkkien ominaisuuksien kehittymistä komponenttien jauhatuksen määrää lisättäessä ja vähennettäessä (liite 8). Taulukkoon 18 on otettu vertailuun pilotjauhetuista koivumassasta ja puolikuivasta mäntymassasta valmistetut kopiopaperiarkit.

Taulukko 18. Koivu- ja mäntymassan jauhatusten määrän vaikutus kopiopaperiar-
kin ominaisuuksiin.

	Seos 4	Seos 5	Seos 6	Seos 7	Seos 8
EOK koivu, kWh/t	32	65	98	32	65
EOK mänty, kWh/t	129	129	129	192	192
Freeness, ml	490	445	410	470	415
Kuidunpituus, mm	1,18	1,17	1,15	1,17	1,17
Gurley, s/100ml	4,6	13,7	34,6	6,9	20,7
Kuivauskutistuma, %	3,5	3,8	4,4	4,0	4,4
Tiheys, kg/m³	563	592	618	569	606
Vetoindeksi, Nm/g	63	76	81	65	76
Repäisyindeksi, mNm²/g	11,0	10,4	9,9	10,4	10,6
Lujuustulo, Vi*Ri	698	790	801	680	807
Puhkaisuindeksi, kPa m²/g	4,9	5,7	6,0	5,1	5,6
ISO-vaaleus, %	89,2	88,7	88,7	88,9	88,8
Opasiteetti, %	75,0	74,0	72,8	75,0	74,7
Valonsirontakerroin, m²/kg	31,1	29,3	27,5	30,7	29,0

Kopiopaperin tärkeiden rakenneominaisuuksien (ilmanläpäisyvastuksen ja kuivauskutistuman) kannalta seoksen 5 jauhatusmäärät (koivu 65 kWh/t ja mänty 130 kWh/t) on paras vaihtoehto, koska niillä saadaan paperille suuri ilmanläpäisyvastus, mutta kuivauskutistuma pysyy pienenä. Jos ilmanläpäisyvastusta halutaan kasvattaa koivun tai männyn jauhatuksen määrää lisäämällä, niin kuivauskutistuma kasvaa voimakkaasti (koivun jauhatusmäärän lisääminen kopiopaperin kannalta edullisin). Toisaalta kuivauskutistuman ollessa ainoa kriteeri, niin koivun jauhatusmäärää vähetämällä kuivauskutistuma pienenee, mutta samalla ilmanläpäisyvastus pienenee myös ratkaisevasti.

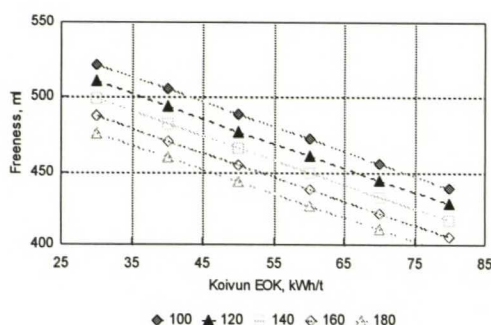
Taulukon 18 perusteella voidaan kopiopaperimassaseoksen optimaaliset jauhatuksen määrät kopiopaperin tärkeiden tilasuureiden suhteen olevan koivulla n. 65 kWh/t ja männyllä n. 130 kWh/t. Koivulla jauhatusmäärä on todellisuudessa korkeampi koska pilotjauhatuksessa koivumassa oli normaalia helpommin jauhautuvaa.

Regressioanalyysi

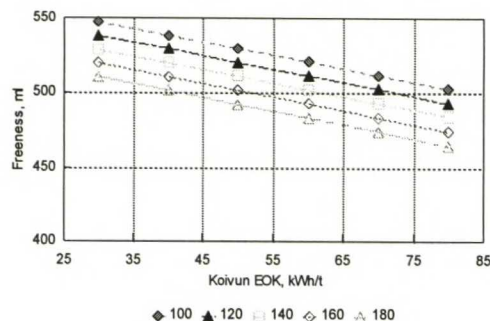
Kopiopaperiarkeista laaditut regressiomallit on esitetty liitteessä 9 ja niiden perusteella laaditut käyrästöt tärkeimmistä ominaisuuksista on esitetty liitteessä 10. Käyrästöjä voidaan tulkita siten, että mitä jyrkempi käyrä on (suuri kulmakertoimen itseisarvo), sitä voimakkaampi on koivun jauhatuksen määrän vaikutus ko. ominaisuuteen. Männyn jauhatusmäärä nähdään käyrien keskinäisenä etäisyytenä. Kuvat on

vertailtavuuden vuoksi piirretty käyttäen samaa skaalausta. Tuloksia tarkastellessa on huomioitava luvussa 14.4.2 koivumassasta esitetyt seikat.

Kuvissa 17 a, b ja c on käyty esimerkinomaisesti läpi regressiomalleilla saatujen käyrästäjien tulkitseminen. Kuvassa 17 a on esitetty pilotjauhetuista massakomponenteista (mänty puolikuiva) valmistetun kopiopaperimassaseoksen freeneksen riippuvuus koivun ja männyn jauhatuksen määrästä. Kuvassa 17 b on esitetty puolestaan tehtaalla jauhetun kuivatushistorialtaan ja massakoostumukseltaan samanlaisen massaseoksen riippuvuus massakomponenttien jauhatuksen määrästä.



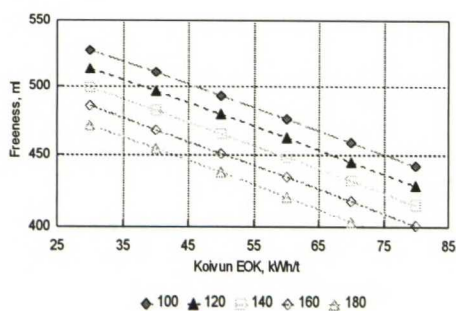
Kuva 17 a. Pilotjauhetuista massakomponenteista valmistetun kopiopaperimassaseoksen freeneksen riippuvuus koivun ja männyn jauhatuksen määrästä. (mänty puolikuiva)



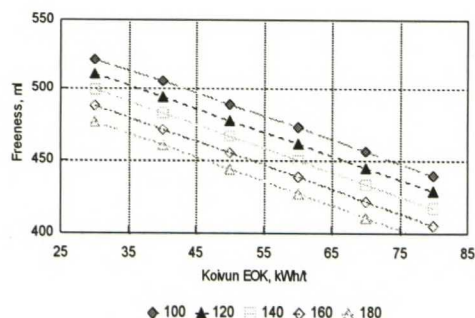
Kuva 17 b. Tehtaalla jauhetuista massakomponenteista valmistetun kopiopaperimassaseoksen riippuvuus koivun ja männyn jauhatuksen määrästä. (mänty puolikuiva)

Kuvissa 17 a ja 17 b massojen kuivatushistoriat ja niiden annostelut ovat samoja, ja näin ollen syntyvät erot johtuvat jauhatuksesta. Verrattaessa jauhatuksia todetaan, että mikäli tehdasjauhatuksella halutaan päästä samaan freeness-tasoon on käytettävä huomattavasti enemmän jauhatusenergiaa massatonna kohden. Lisäksi kuvista havaitaan, että muutokset koivun jauhatusmäärässä vaikuttavat pilotjauhetuilla massoilla voimakkaasti koko massaseoksen freeneeseen. Männyn jauhatusmäärän vaikutus kopiopaperimassaseoksen freeness-tasoon on pienempi ja pilotjauhatuksessa männyn merkitys on ainoastaan hieman suurempi kuin tehdasjauhatuksessa. Tästä voidaan päätellä, että kopiopaperimassaseoksen freeness-taso määräytyy pääasiassa koivun jauhatuksella, kun hyllyn annostelu on vakio.

Kuvassa 17 c on esitetty regressiomallilla saatu käyrästä silloin, kun pilot jauhettu mänty on putkimassaa. Verrattaessa kuvaa 17 c kuvaan 17 a, todetaan, että samoilla jauhatusmäärillä, päästään putkimännöllä hieman alhaisempaan freeneeseen ja männyn suhteellinen osuus freeneksen muutokseen on vähän suurempi.



Kuva 17 c. Pilotjauhetuista massakomponenteista valmistetun kopiopaperimassaseoksen freeneksen riippuvuus koivun ja männyn jauhatuksen määrästä. (mänty putkimassaa)



Kuva 17 a. Pilotjauhetuista massakomponenteista valmistetun kopiopaperimassaseoksen freeneksen riippuvuus koivun ja männyn jauhatuksen määrästä. (mänty puolikuiva)

Optimaalisen jauhatustuloksen saavuttamiseksi tulee tehtaalla käytetyllä (kuluneella) terityksellä mäntymassaa jauhaa kopiopaperin tärkeiden paperitekniisten ominaisuuksien suhteen mahdollisimman paljon (jopa kuivauskutistuman ja optisten ominaisuuksien). Käytännössä tämä tarkoittaa vähintään 180 kWh/t. Koivumassaa tulee puolestaan kuivauskutistuman ja optisten ominaisuuksien perusteella jauhaa mahdollisimman vähän ja ilmanläpäisyvastuksen (huokoisuuden) ja vetolujuuden perusteella mahdollisimman paljon. Käytännössä tästä seuraa, että mikäli hylkyä ei ole riittävästi käytettävissä, niin huokoisuus tavoite saavutetaan jauhamalla koivua pidemmälle (n. 80 kWh/t), kuivauskutistuman kustannuksella.

Pilotjauhatuksessa käytetyillä LM-terillä on havaittavissa männyn jauhatusmäärässä optimi. Kuivauskutistumalla on optimi männyn jauhatusmäärällä 120 kWh/t, mutta kutistuma kasvaa varsin maltillisesti 140 kWh/t asti. Ilmanläpäisyvastuksen kehittymiseen männyn jauhatusmäärällä voidaan vaikuttaa varsin rajallisesti. Optisten ominaisuuksien suhteen mäntyä tulisi jauhaa vähän ja vetolujuuden suhteen 140 - 200 kWh/t, riippuen massan kuivatushistoriasta.

Regressiomalleilla saadut tulokset männyn kuivatushistorian merkityksestä hienopaperimassaseoksen ominaisuuksiin ovat samantapaiset kuin verrattaessa puhtaita mäntymassoja. Massaseoksen paperiteknisissä ominaisuuksissa ei ole käytännössä eroa käytettiinmäntymassana puolikuivaa- tai putkimassaa. Putkimassaa käytettäessä samoihin ominaisuuksiin päästään hieman pienemmällä jauhatuksen määrällä.

Katkova mäntyjauhatus

Katkovalla jauhatuksella männyn kolmantena jauhatusvaiheena pyrittiin parantamaan massan formaatiopotentialia. Taulukossa 19 on esitetty fibrilloivan ja katkovan

mäntyjauhatuksen ero kopiopaperiarkin ominaisuuksiin. Massat ja annostelut ovat molemmissa samat. Erona on ainoastaan männyn kolmannen vaiheen teritys, joka fibrilloivassa jauhatuksessa oli LM-teritys ja katkovassa jauhatuksessa TM-teritys. Näitä tuloksia on verrattu kartoitukoeajossa tehtaalla jauhetun kopiopaperiarkin ominaisuuksiin.

Taulukko 19. Fibrilloivan LM-terityksen ja katkovan TM-terityksen vaikutus kolmantena jauhatusvaiheena kopiopaperiarkin ominaisuuksiin.

	Pilot				Kartoitus	
	Fibrilloiva		Katkova		Fibrilloiva	
EOK koivu, kWh/t	32	65	32	65	42	68
mänty, kWh/t	192	192	198	198	165	165
Freeness , ml	470	415	425	370	510	480
Kuidunpituus , mm	1,17	1,17	1,1	1,08	1,2	1,21
Gurley , s/100ml	6,9	20,7	11,2	27,7	4,9	9,1
Kuivauskutistuma , %	4,0	4,4	3,5	4,1	3,8	3,9
Vetoindeksi , Nm/g	65	76	62	72	60	66
Repäisyindeksi , mNm ² /g	10,4	10,6	9,2	9,1	10,2	10,1
Lujuustulo , Vi* <i>Ri</i>	680	807	566	656	614	666
Puhkaisuindeksi , kPam ² /g	5,1	5,6	5,0	5,7	4,7	5,3
Vaaleus , %	88,9	88,8	89,1	88,6	87,8	87,6
Opasiteetti , %	75,0	74,7	72,6	74,8	75,9	73,5
Valonsirontakerroin , m ² /kg	30,7	29,0	27,4	28,9	32,2	31,1

Katkovalla terityksellä todetaan kopiopaperimassan suotautumisvastuksen lisääntyvän 45 ml ja kuitujen keskipituuden lyhenevän n. 0,1 mm verrattuna fibrilloivalla terityksellä jauhettuun mäntymassaan. Kopiopaperin kannalta katkovan jauhatusvaiheen käyttö on edullista suuremman ilmanläpäisyvastuksen ja pienemmän kuivauskutistuman johdosta. Kopiopaperin lujuusominaisuuksiin kuitujen katkominen vaikuttaa haitallisesti. Vetolujuuden kehittyminen pysähtyy ja repäisyjuuus heikkenee.

Verrattaessa tuloksia tehtaalla vallitsevaan normaaliin tasoon, todetaan katkovan jauhatusvaiheen vaikuttavan haitallisimmin repäisyjuuuteen ja valonsirontakertoimeen. Lujuustulo pysyy kuitenkin lähes tehtaan tasolla hyvän vetolujuuden ansiosta. Tehtaalla ei ole todettu lujuusongelmia, joten lujuudet eivät ole esteenä katkovan terityksen käytölle. Tulosten perusteella katkovan terityksen käyttöä voidaan pitää mielenkiintoisena vaihtoehtona.

Mielenkiintoinen yksityiskohta on, että kopiopaperiarkin kuivauskutistuma pieneni selvästi, kun mänty jauhettiin lopuksi katkovalla terityksellä. Puhtaasta mäntymassasta määritetty kuivauskutistumahan kasvoi selvästi enemmän katkovalla TM-terällä kuin fibrilloivalla LM-terällä (taulukko 19).

14.5 Yhteenveto

Mänty- ja koivumassa

Männyn jauhatustulosten perusteella voidaan todeta, että uusilla LM-terillä on voidaan vähentää merkittävästi mäntylinjan energian kulutusta tai vastaavasti lisätä linjan jauhatuskapasiteettia pyrittäessä samanlaiseen jauhatustulokseen kuin kartoituskoeajossa. Tulosten perusteella vakiofreeness-tasoon jauhetun puolikuivan massan ja putkimassan välillä ei ole käytännössä eroa paperiteknisissä ominaisuuksissa. Kap. 90 %:iin kuivattu mäntymassa puolestaan erottui ominaisuuksien kehittymiseltään selvästi. Tulos viittaa siihen, ettei männyn kuivauksella kap. 80 %:iin saada esille kuivauksen aikaansaamia vaikutuksia kuituun. Toisaalta voi olla mahdollista, ettei 50 % puolikuivaa massaa putkimassan seassa ei ole riittävä määrä, vaan putkimassan ominaisuudet dominoivat.

Katkova teritys männyn viimeisenä jauhatusvaiheena lyhensi selvästi keskikuidunpituutta ja kasvatti ilmanläpäisyvastusta ja kuivauskutistumaa. Lujuusominaisuuksien kasvun todettiin pysähtyvän, mutta optisiin ominaisuuksiin katkomisella ei ollut vaikutusta.

Koivun jauhatustulosten perusteella vaikuttaa, ettei koivujauhimien terityksellä ole yhtä suurta merkitystä massan jauhautuvuuteen kuin männyllä. Terityksessä kannattaa siirtyä käyttämään kuitenkin hienompi teriä (OSK pienenee). Pilotkoeajojen perusteella SC-terityksen todettiin soveltuvan paremmin kopiopaperimassan jauhaukseen, sillä saavutettavan pienemmän kuivauskutistuman ansiosta. Jauhatusmäärän lisääminen (lisä jauhimen hankkiminen) vaikuttaa tehokkaimmalta keinolta lisätä massan jauhautuvuutta.

Kopiopaperimassa

Kopiopaperiarkeista määritettyjen tulosten perusteella nykyisellä kuluneella ja karkealla mäntyterityksellä tulee jauhaa mahdollisimman paljon eli käytännössä 180 kWh/t. Teritystä uusittaessa pilotkoeajon suuntaan voidaan männyn jauhauksen määrän

tarpeen olettaa putoavan. Optimijauhatusmääräksi mäntymassalle LM-terityksellä jauhettaessa pilotkoeajon perusteella tulee noin 120 - 140 kWh/t. Kopiopaperimassaseoksesta valmistettujen arkkien ominaisuuksissa ei myöskään saatu merkittävää eroa puolikuivan ja putkimäntymassan välille.

Koivun jauhatuksen määrä ei regressiomallien perusteella ole yksiselitteinen. Pienen huokoisuuden, hyvän vetolujuuden ja toisaalta massan suotautumisvastuksen kannalta koivua tulisi jauhaa paljon. Kuivauskutistuma ja optiset ominaisuudet heikkenevät kuitenkin jatkuvasti koivun jauhatusmäärän lisääntyessä. Koivulle on tehtävä kompromissi kuivauskutistuman ja ilmanläpäisyvastuksen välillä. Kopiopaperimassaan koivua tulee jauhaa melko paljon n. 80 kWh/t, jolloin saadaan ilmanläpäisyvastus kehittymään halutulle tasolle, kuivauskutistuman kustannuksella.

Tulosten perusteella mäntykuitujen katkomisella jauhatuksen kolmannessa vaiheessa on selvä kopiopaperimassan formaatiopotentiaalia lisäävä vaikutus. Samalla vetolujuuden kehittyminen pysähtyy ja repäisylujuus heikkenee. Katkovan jauhatuksen todettiin pienentävän kopiopaperiarkin kuivauskutistumaa ja huokoisuutta sekä lisäävän suotautumisvastusta. Katkovan terityksen käyttö viimeisenä jauhatusvaiheena tehdasmittakaavassa edellyttää, että männyn kahdella ensimmäisellä jauhatusvaiheella ja koivun jauhatuksella saadaan massaseoksen lujuuspotentiaali riittävälle tasolle.

Muita huomioita

Ominaisrämäkuormateorian puutteellisuus tuli esille pilotkoeajossa. Koeajossa jauhettiin samaa mäntymassaa sekä LM-terityksellä (OSK 4,7 J/m) että TM-terityksellä (OSK 3,7 J/m). Teorian mukaan pienempi ominaisrämäkuorma antaa varovaisemman jauhatuksen eli katkoo kuituja vähemmän. Tuloksissa todettiin kuitenkin TM-terityksen kolmannessa vaiheessa voimakkaasti katkovan kuituja ja samassa vaiheessa LM-terityksen kehittävän vielä kuituja. Tämän vuoksi ominaisrämäkuorman rinnalla on hyvä pitää ominaispintakuormaa, joka ottaa huomioon terägeometriasta särmän leveyden. Ominaispintakuormalla LM-terityksellä saavutettiin pilotkoeajossa varovaisempi jauhatus (OPK 990 J/m²) kuin TM-terityksellä (OPK 1230 J/m²).

15. TEHDASKOEAJO

15.1 Tavoite

Diplomityötä aloitettaessa tehdaskoeajon tavoitteeksi asetettiin jauhatuksen ja terityksen optimointi. Tavoitteesta jouduttiin kuitenkin tinkimään, koska aikataulun puitteissa ei ollut mahdollista saada tehtaalle pilotkoeajon perusteella valittuja uudentyyppisiä mäntyteriä. Pilotkoeajon perusteella oli pääteltävissä, että varsinkin mäntylinjalla uusilla terillä saadaan selvästi erilainen jauhatustulos.

Uusien ja uudentyyppisten terien puuttuessa uudeksi tehdaskoeajon tavoitteeksi asetettiin jauhatuksen määrien, putkimassaosuuden ja hylyn määrän vaikutuksien selvitys kopiopaperista mitattuihin tärkeisiin tilasuureisiin ja paperikoneen ajettavuuteen. Tuloksien perusteella voidaan jatkossa kiinnittää suurempi huomio niihin muuttujiin, joilla todella on merkitystä.

15.2 Koesuunnitelma

Tehdaskoeajossa päädyttiin käyttämään koesuunnittelussa Taguchi-menetelmää, jolla voidaan selvittää käytettyjen muuttujien osuudet tutkittavaan ominaisuuteen. Tässä diplomityössä ei ko. menetelmän teoriaa ole käsitelty yksityiskohtaisesti, vaan on ainoastaan selvitetty tulosten tulkintaa. Taguchi-menetelmää käsitteleviä teoksia löytyy useita mm. seuraavista viitteistä /94,95,96/.

Tehdaskoeajossa käytettiin L8-ortogonaalimatriisia, joka antaa mahdollisuuden tutkia seitsemän eri muuttujan vaikutuksia kahdella eri tasolla. Mikäli muuttujia ei ole riittävästi voidaan tutkia muuttujien keskinäisvaikutuksia. L8-matriisilla koeajoon tulee ainoastaan 8 koepistettä. Taulukossa 20 on esitetty muuttujat ja niiden tasot. Taulukossa 21 on esitetty tehdaskoeajon koesuunnitelma.

Taulukko 20. Tehdaskoeajon muuttujat ja niiden tasot.

Koodi	Muuttuja	Taso 1	Taso 2
A	Putkimassan osuus, %	50	100
B	Koivun jauhatuksen määrä, kWh/t	50	80
C	Männyn jauhatuksen määrä, kWh/t	180	150
D	Hyllyn osuus, %	23	43

Taulukon 20 muuttujien tasoista on syytä huomioida, että männyn tasolla 1 käytetään poikkeuksellisesti korkeampaa jauhatuksen määrää.

Taulukko 21. Tehdaskoeajon Taguchi-koesuunnitelma.

Koodi	Muuttuja	Koepiste							
		1	2	3	4	5	6	7	8
A	Putkimassan osuus, %	50	50	50	50	100	100	100	100
B	Koivun EOK, kWh/t	50	50	80	80	50	50	80	80
AxB	Keskinäisvaikutus	-	-	-	-	-	-	-	-
C	Männyn EOK, kWh/t	180	150	180	150	180	150	180	150
AxC	Keskinäisvaikutus	-	-	-	-	-	-	-	-
BxC	Keskinäisvaikutus	-	-	-	-	-	-	-	-
D	Hylyn osuus, %	23	43	43	23	43	23	23	43

15.3 Toteutus

Tehdaskoeajoa varten ei saatu uuden tyyppisiä LM-teriä mäntylinjalle, joten koeajo suoritettiin jauhimissa olevilla terillä. Linjan teritystä oli kartoituskoeajon jälkeen muutettu vaihtamalla kolmannen vaiheen BB-teritys käytettyihin, mutta teroitettuihin AA-teriin. Mäntylinjan teritys koeajossa oli siis BB - AA - AA.

Koivun jauhatukseen oli käytettävissä uusia MX- (FF-) teriä. Koivulle ei kuitenkaan kerralla haluttu vaihtaa kaikkia teriä, vaan tyydyttiin vaihtamaan koivulinjan 1 AA-teritys MX-teriin. Tehdaskoeajoa varten uusi teritys koivulinja 1:lle oli MX ja koivulinja 2:lle sama kuin aikaisemmin eli AA - MX.

Koeajo toteutettiin siten, että paperikoneen kaikki säädöt ja lisä- ja täyteaineiden anostelut säädettiin KymCopy Lux-lajin (vaaleus ISO 93) tavoitearvotaulukon mukaisiksi. Jokaisen koepisteen alkaessa tehtiin koesuunnitelman mukaiset muutokset ja koepisteitä ajettiin yksi konerulla. Mäntymassan kuivatushistorian vaihtuessa neljännen ja viidennen koepisteen välissä ajettiin yksi välirulla, jotta muutokset massakoostumuksessa ehtivät tapahtua (välissä männyn annostelusäiliö). Koepisteistä otettiin poikkiratanäytteet konerullan pinnasta. Tämän lisäksi otettiin massanäytteitä jauhimilta ja perälaatikosta.

Jauhettaessa suuremmilla jauhatusmäärien tasoilla (koivu 80 kWh/t ja mänty 180 kWh/t) kokonaisenergia jaettiin tasan jauhatusvaiheiden välille. Männyn jauhatuksen

määrällä 150 kWh/t vähennettiin ensimmäisen jauhimen tehoa niin paljon, että tavoite EOK saavutettiin. Koivulinjoilla 1 ja 2 pidettiin EOK:t samoina. Jauhettaessa koivua alhaisemmalla jauhatuksen määrän tasolla (50 kWh/t) pyöri koivulinja 2:n ensimmäinen jauhin terät auki (EOK 5 kWh/t). Jauhatussakeudet vakioitiin koivulla 4,5 %:iin ja männyllä 4,3 %:iin. Hylyn määrän muuttuessa koepisteiden välillä tuoremassojen anostelua muutettiin tarvittavaan suuntaan, jotta koivu / mänty -suhde pysyi 70 / 30.

15.4 Tulosten tulkitseminen

Koesuunnitelma oli laadittu ortogonaalisella L8-matriisilla, joten perälaatikko- ja paperinäytteiden analysointiin voitiin käyttää varianssianalyysiä (Labpartner -tietokoneohjelma). Koivu- ja mäntyjauhimita otetuissa näytteissä seurattiin ainoastaan ominaisuuksien kehittymistä EOK:n funktiona.

Tehdaskokeessa ei sovellettu kaikkia Taguchi-menetelmän mahdollisuuksia. Kokeessa ei ollut mukana ulkomatriisia, josta seurasi, ettei ollut mahdollista tutkia häiriötekijöiden aiheuttamaa hajontaa (signaali - kohinasuhde). Näinollen tuloksissa päädyttiin tarkastelemaan ainoastaan kokeen muuttujien vaikutuksia ominaisuuksien keskiarvoon. Optimiasetuksilla saavutettavaa ominaisuuden arvoa ei kuitenkaan ennustettu, vaikka menetelmä antaa siihen mahdollisuuden, koska optimiarvo muuttuu uusien mäntyterien asennuksen jälkeen. Koeajosta ei tehty myöskään konfirmaatiokoeajoja, osittain ajan puutteen vuoksi ja osittain suuren tilasuureiden määrän vuoksi (ei ole yhtä selvää optimoitavaa ominaisuutta).

Taulukoissa esitetyistä varianssianalyysin tuloksista on poistettu (pooling) kaikkein pienivaikutteisimmat tekijät $< 3 \%$ ja ne on lisätty kokeen kokonaisvirheeseen (e). Taulukoituhiin tuloksiin on otettu mukaan P %, jolla kuvataan muutosten suhteellista osuutta tutkittuun ominaisuuteen (P % on laskettu puhtaasta neliösummasta). Tulosten luotettavuutta kuvataan confidenssi eli merkitsevyysanalyysillä, jossa F-kerrointa (Fisher-kerroin) verrataan taulukkolukuihin, ja tulokseksi saadaan luotettavuusväli. Virheen (e) P % kuvaa kokeen ulkopuolisten tekijöiden osuutta tutkittuun ominaisuuteen.

Koeajolla oli tarkoituksena saada selville, millä tutkituista muuttujista kokeessa käytetyillä tasoilla on merkitsevyyttä mitattuihin ominaisuuksiin, eli tarkastellaan P %:n suuruutta ja merkitsevyyttä eri ominaisuuksien suhteen. Keskiarvoille laadittiin myös

Taguchi-menetelmälle tyypilliset vastetaulut, joista selviävät muuttujien eri tasoilla saavutettavat ominaisuuksien arvot.

15.5 Tulokset ja johtopäätökset

Tehdaskoeajo toteutettiin 12 - 13.6.1995 välisenä aikana. Koeajo onnistui kokonaisuudessaan hyvin. Ongelmaksi koeajon aikana muodostui männyn jauhatuksen määrän säätö. Tämän vuoksi koepisteissä 1, 3 ja 5 jouduttiin poikkeamaan männyn jauhatusmäärän tavoitteesta.

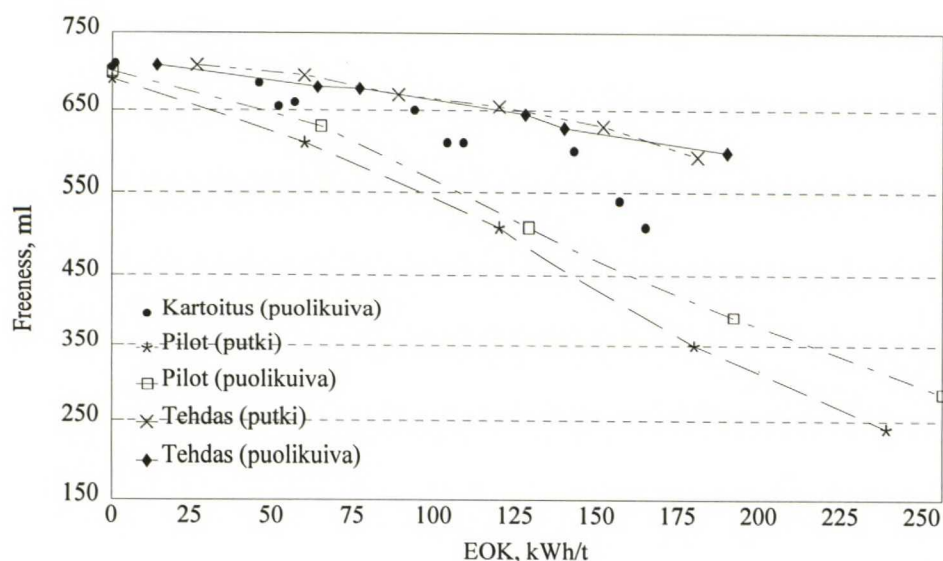
Liitteessä 11 on esitetty koivu- ja mäntymassojen jauhatustulokset sekä perälaatikko-näytteistä tehdyt määritykset. Tehdaskoeajojen paperimääritysten tulokset on esitetty kartoituskoeajon tuloksien yhteydessä liitteessä 3. Vastetaulukot on esitetty liitteessä 12.

15.5.1 Mänty- ja koivumassan jauhatus

Massanäytteet otettiin jauhatusvaiheiden jälkeen. Kokeen tuloksia verrataan kuivatushistorialtaan samanlaisen massan kartoitus- ja pilotkoeajon tuloksiin.

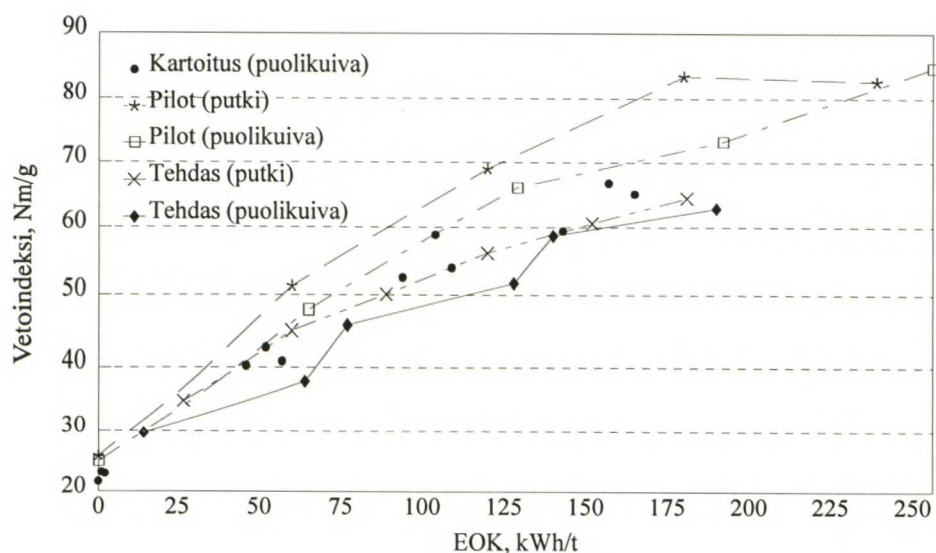
Koivumassan jauhatus-pH oli 6,5 ja Ca^{2+} -pitoisuus noin 30 mg/l. Männyllä vastaavat arvot olivat hiukan korkeammat pH 7,5 ja Ca^{2+} -pitoisuus 54 mg/l. Tulokset ovat samalla tasolla kuin ionipitoisuuden selvityksessä saatiin (luku 13).

Kuvassa 18 verrataan tehdaskoeajon männyn freenestä pilot- ja kartoituskoeajon tuloksiin. Kuvasta todetaan, että pilotkoeajossa massa jauhautui merkittävästi nopeammin kuin kartoitus- ja tehdaskoeajossa (huomioi pilotkoeajon jauhatussakeus, vaikka se ei sakeuskoeajon perusteella vaikuta). Verrattaessa tehdaskoeajon puolikuivaa mäntymassaa putkimassaan ei freenksen kehittämisessä ole eroa käytetyllä EOK:n alueella. Ensimmäisen jauhatusvaiheen jauhatuksen määrällä ei myöskään ole vaikutusta, vaan käytetty kokonais-EOK ratkaisee massan jauhautuneisuuden. Verrattaessa kartoituskoeajon tuloksia tehdaskoeajoon todetaan jauhautumisen selvästi hidastuneen. Tulos on selitettävissä ainakin osittain mäntyterien kulumisella viiden kuukauden ajanjaksolla sekä mahdollisesti sellun laatu vaihteluilla.



Kuva 18. Männyn freeneksen kehittyminen EOK:n funktiona.

Kuvaan 19 on piirretty männyn vetoindeksin kehittyminen jauhatusmäärän funktiona. Kuvasta havaitaan, että putkimassalla vetoindeksi kehittyy hieman nopeammin kuin puolikuivalla massalla. Kartoituskoeajossa vetoindeksin kehittyminen oli hieman nopeampaa kuin tehdaskoeajossa samanlaisen kuivatushistorian omaavalla massalla, mutta pilotkoeajossa vetoindeksin kehittyminen oli nopeinta.



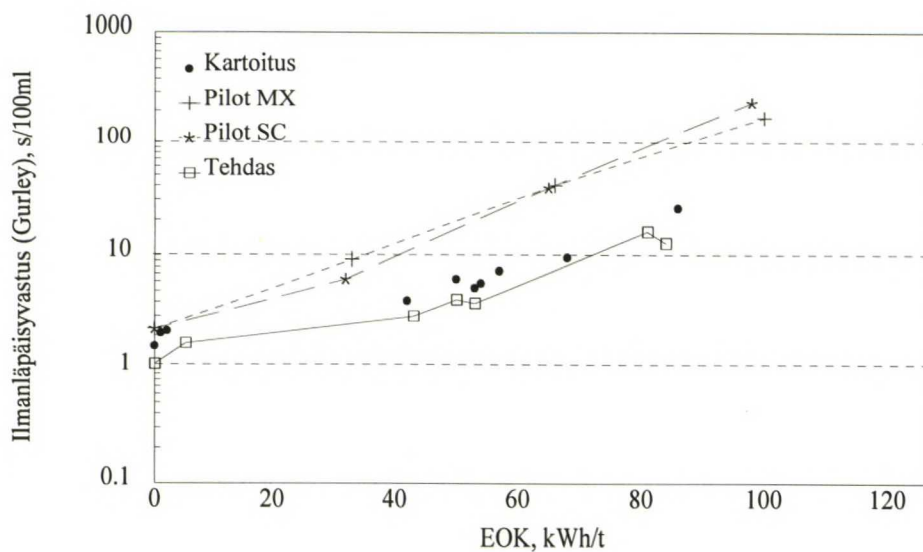
Kuva 19. Männyn vetoindeksin kehittyminen EOK:n funktiona.

Tarkasteltaessa muita mäntymassasta määritettyjä ominaisuuksia voidaan todeta, että samassa EOK:n tasossa tehdaskoeajon tulokset jäävät hieman alhaisemmalle tasolle kuin kartoituskoeajossa (repäisyindeksi korkeampi), ja että puolikuivan ja putkimassan välillä ominaisuuksissa on vain marginaalinen ero. Mikäli tuloksia verrataan samassa

freeness-tasossa, niin tehdaskoeajossa joudutaan käyttämään merkittävästi enemmän jauhatusenergiaa saman jauhatustuloksen saavuttamiseksi kuin kartoituskoeajossa.

Koivun jauhautumisessa on vain pieni ero kartoitus- ja tehdaskoeajojen välillä. Tuloksissa on syytä huomioida kartoituskoeajon jauhatussakeus 4,0 % ja tehdaskoeajon 4,3 %. Sakeusero on sakeuskoeajon perusteella riittävän suuri peittämään terien kulumisesta aiheutuneen jauhautumisen hidastumisen.

Kuvassa 20 on esitetty koivun ilmanläpäisyvastuksen kehittyminen EOK:n funktiona. Kuvasta havaitaan, että ilmanläpäisyvastus kehittyy lähes samalla tavalla molemmissa tehtaalla tehdyissä määrittelyissä. Tehdasjauhatuksen hieman pienempi ilmanläpäisyvastuksen kehittyminen johtuu todennäköisesti sellun laadusta, mikä näkyy jauhamattoman massan lähtötasosta



Kuva 20. Koivun ilmanläpäisyvastuksen kehittyminen EOK:n funktiona.

Koivun jauhatus tuloksista on myös todettavissa, että vaikka koivulinjoilla 1 ja 2 on erilaiset teritykset ja eri määrä jauhimia, päästään niillä samaan jauhatustulokseen, kun käytetään sama määrä energiaa massatonna kohden. Tulosten perusteella koivun jauhatustulokseen vaikuttaa ratkaisevasti jauhatuksen määrä, eikä jauhimen terityksellä ole yhtä suurta vaikutusta kuin mäntymassalla.

15.5.3 Perälaatikkonäytteet

Perälaatikkonäytteestä määritettiin freeness, keskikuidunpituus, pituusmassa, sakeus ja pH. Määritysten perusteella laskettiin perälaatikkomassalle miehitysluku. Miehitysluvun laskentakaava on esitetty kirjallisuusosan kaavassa 2.

Perälaatikosta mitattu pH vaihteli koepisteissä välillä 7,9 - 8,4 ja Ca²⁺-ionipitoisuus oli hieman yli 30 mg/l.

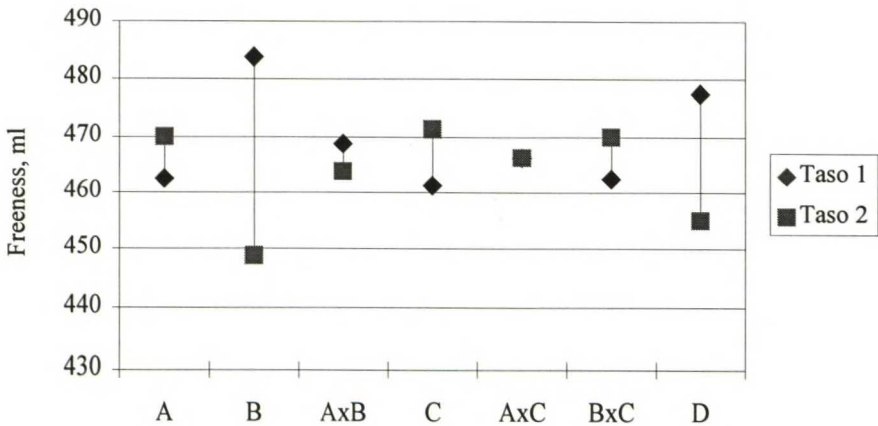
Taulukossa 22 on esitetty freenessin ja miehitysluvun merkitsevyydet.

Taulukko 22. Perälaatikkomassan freenessin ja miehitysluvun merkitsevyydet.

	A	B	AxB	C	AxC	BxC	D	e
Freeness	pooled	60,48 **	pooled	3,33	pooled	pooled	23,97	12,22
Miehitysluku	37,84 *	2,35	20,42 *	pooled	1,96	33,01 *	pooled	6,41

* 95 %:n luotettavuusväli
** 99 %:n luotettavuusväli
*** 99,5 %:n luotettavuusväli

Perälaatikosta määritettyyn freenessiin vaikuttavat jauhatusten määrät ja hylyn osuus. Koivun jauhatuksen määrän vaikutus on selvästi suurin ja tulos on 99 %:n luotettavuusvälin sisällä. Kuvassa 21 on esitetty perälaatikosta mitatun freenessin vastetaulu. Vastetaulun mukaan lisäämällä koivun EOK:ta 50 kWh/t ⇒ 80 kWh/t perälaatikon freeness putoaa 35 ml. Vastaavasti lisäämällä hylkyä 23 %:sta ⇒ 43 %:iin freenessin pudotus on 23 ml. Nostamalla männyn jauhatusta 150 kWh/t ⇒ 180 kWh/t freeness putoaa 10 ml. Perälaatikon freenessilla on puolestaan suuri merkitys massan suotautumiseen viiraosalla ja tätä kautta paperin formaatioon.



Kuva 21. Perälaatikkomassasta määritetyn freenessin vastetaulu.

Massan miehityslukuun vaikuttaa tutkituista muuttujista voimakkaimmin putkimassan osuus. Lisäksi muuttujilla on voimakkaita keskinäisvaikutuksia. Tämän perusteella perälaatikkomassan formaatiopotentiaaliin ei voida yksiselitteisesti vaikuttaa massakomponenttien jauhatuksen määrillä. Vastetaulun perusteella mäntynä on edullisinta käyttää putkimassaa. Käyttämällä putkimassaa saadaan massan formaatiopotentiaali ja massan suhteellinen osuus formaatiosta mahdollisimman suureksi. Lopullinen paperin formaatio määräytyy tämän jälkeen rainanmuodostusprosessin (viiraosan) toiminnasta.

Miehityslukua voidaan tarkastella myös ilman varianssianalyysiä. Kirjallisuudessa esitetään hienopaperimassan tyypilliseksi miehitysluvuksi 27 /28/. Tässä kokeessa saatiin miehitysluvut välille 26,7 - 28,7. Tuloksen perusteella voi tehdä johtopäätöksen, että PK 9:n perälaatikkomassan formaatiopotentiaali on keskimääräisellä tasolla, ja paperin formaation parantamiseksi olisi optimoitava viiraosan toiminta.

15.5.3 Paperinäytteet

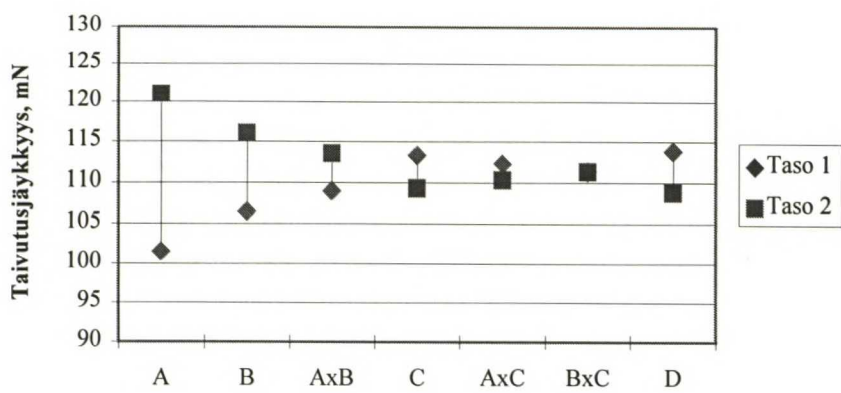
Paperinäytteet otettiin poikkiratanäytteinä ja ominaisuudet määritettiin poikkiratanäytteen keskeltä. Paperista määritettyjen tärkeimpien lujuusominaisuuksien merkitsevyyksiä on esitetty taulukossa 23.

Taulukko 23. Paperin lujuusominaisuuksien merkitsevyyksiä.

	A	B	AxB	C	AxC	BxC	D	e
Vetoindeksi ks	pooled	11,2	pooled	19,2 *	6,7	47,6 *	10,6	4,7
Repäisyindeksi ps	pooled	62,5***	3,2	5,1	5,1	pooled	20,0*	17,5
Lujuustulo ks	34,4 *	1,7	pooled	26,2	pooled	8,9	19,1	9,7
Lujuustulo ps	pooled	57,9 *	15,0	3,8	10,5	6,8	pooled	6,0
Palstautumislujuus	3,6	72,8 **	pooled	pooled	pooled	7,4	7,9	8,2
Taivutusjäykkyys ks	69,7 **	15,6 *	2,5	pooled	pooled	pooled	3,4	8,7
Taivutusjäykkyys ps	27,7 *	pooled	pooled	7,7 *	34,6 *	7,7 *	21,6 *	0,7

* 95 %:n luotettavuusväli
** 99 %:n luotettavuusväli
*** 99,5 %:n luotettavuusväli

Kopiopaperin tärkein lujuusominaisuus tuoteanalyyisin perusteella on taivutusjäykkyys. Kone- ja poikkisuuntaiseen taivutusjäykkyyteen vaikuttaa taulukon 23 mukaan eniten männyn putkimassan osuus. Kuvassa 22 on esittetty koneen suuntaisen taivutusjäykkyyden vastetaulu. Vastetaulun perusteella on edullisinta käyttää putkimäntymassaa. Koivumassaa tulisi jauhaa paljon eli 80 kWh/t.



Kuva 22. Paperin koneen suuntaisen taivutusjäykkyyden vastetaulu.

Paperikoneen ajettavuuden kannalta paperin koneensuuntainen vetolujuus ja poikki-suuntainen repäisylujuus ovat tärkeitä ominaisuuksia, tosin kopiopaperissa ominaisuudet eivät ole kriittisiä. Molempien ominaisuuksien kannalta on vastetaulun perusteella edullista jauhaa koivua 80 kWh/t ja käyttää hylkyä 43 %. Mäntyä on edullisempi jauhaa 150 kWh/t. Näiden lisäksi on olemassa voimakkaita keskinäisvaikutuksia. Palstautumislujuteen koivun jauhatuksen määrällä on tutkituista muuttujista selvästi voimakkain vaikutus ja vastetaulun mukaan koivua on tulee jauhaa 80 kWh/t.

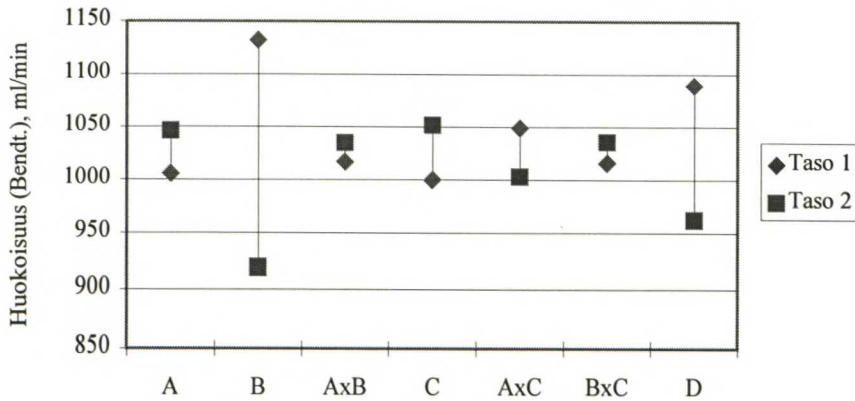
Taulukossa 24 on esitetty paperin rakenne- ja optisten ominaisuuksien merkitsevyyksiä. Kopiopaperin tuoteanalyysin mukaan kaikki taulukossa 24 esitetyt ominaisuudet ovat tärkeitä.

Taulukko 24. Paperin rakenne- ja optisten ominaisuuksien merkitsevyyksiä.

	A	B	AxB	C	AxC	BxC	D	e
Karheus vp	12,7	42.6 *	pooled	pooled	6,6	pooled	pooled	37,3
Karheus yp	18,9	8,2	pooled	18,9	4,8	41,3	pooled	8,0
Huokoisuus, Bendt.	pooled	64.9 **	pooled	2,7	2,0	pooled	22,5 *	8,0
Huokoisuus, Gurley	pooled	52.7 **	5,0	12,4 *	pooled	pooled	22.9 *	7,0
Formaatio	pooled	83.0 *	pooled	4,3	3,4	4,5	3,1	1,7
Käyrist. (lamppu)vp	6,2	17,3	pooled	6,2	24,7	2,4	33,3	9,9
Kupruilu	67,1	5,3	5,3	21,1	0,4	0,4	0,4	100,0
Kupruilu ilm.jälk.	65,0 ***	pooled	pooled	18,2	pooled	pooled	23,7 *	11,7

* 95 %:n luotettavuusväli
** 99 %:n luotettavuusväli
*** 99,5 %:n luotettavuusväli

Kuvassa 23 on esitetty Bendtsen huokoisuuden vastetaulu. Kuva osoittaa selvästi koivun jauhatusmäärän ja hyllyn osuuden merkitsevyyden paperin huokoisuuteen sekä männyn jauhatuksen pienen merkitsevyyden.



Kuva 23. Paperin Bendtsen huokoisuuden vastetaulu.

Tehdaskoeajon tulosten perusteella paperista mitattuun formaatioon vaikuttaa lähes ainoastaan koivun jauhatuksen määrä. Formaation kannalta on edullista jauhaa koivua 80 kWh/t. Männyn jauhaminen 180 kWh/t ja runsas hyllyn käyttö on myös formaation kannalta edullista.

Lamppu menetelmällä mitattuun käyristymiseen ei saatu luotettavuuksia, mutta eniten siihen vaikuttavat koivun jauhatuksen määrä ja hyllyn osuus. Pienimmän käyristymisen kannalta tulisi käyttää vähän hylkyä sekä jauhaa massoja vähän. Lamppu käyristymisen on ainoa kopiopaperin tärkeä ominaisuus, jonka mukaan koivua tulisi jauhaa alhaisemmalla tasolla.

Koeajossa ei saatu käytetyillä muuttujien tasoilla eroja paperin kupruuntumiseen. Kaikkien koepisteiden kupruuntumiset olivat keskenään samalla tasolla ja paperit olivat suhteellisen kupruuntuvia /97/. Mikäli tuloksesta erotetaan paperin pinnan korkeuden hajonta 40 % RH -ilmastoinnin jälkeen, niin putkimassan ja hyllyn osuudella sekä männyn jauhatuksella on selvä merkitys. Pienin pinnan korkeuden hajonta saavutetaan käyttämällä puolikuivaa mäntymassaa ja jauhamalla sitä 180 kWh/t sekä käyttämällä hylkyä 23 %.

Optisiin ominaisuuksiin tehdaskoeajossa käytetyillä muuttujilla ei saatu merkitsevyys-
siä. Syynä voi olla, että mm. täyteaineiden ja värin annostelut vaikuttavat optisiin ominaisuuksiin voimakkaasti.

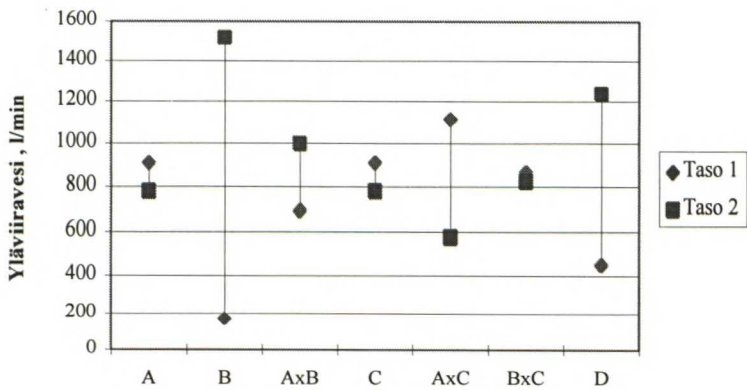
Taulukossa 25 on esitetty tehdaskoeajon aikana koneella vallitsevien olosuhteiden merkitsevyyksiä.

Taulukko 25. Koneolosuhteiden merkitsevyyksiä.

	A	B	AxB	C	AxC	BxC	D	e
Yläviiravesi	pooled	63,2 ***	2,8	pooled	9,8 *	pooled	21,3 **	3,0
Imu 2. kammio	pooled	67,0***	pooled	pooled	pooled	pooled	14,8	18,3
Flokkivahvuus	pooled	49.5 ***	pooled	pooled	21,4 *	pooled	21,4 *	7,7
Höyryn kulutus	2,6	1,2	2,4	0,0	0,7	1,6	1,9	89,2

* 95 %:n luotettavuusväli
** 99 %:n luotettavuusväli
*** 99,5 %:n luotettavuusväli

Yläviiralle suotautuvan veden määrä on voimakkaasti riippuvainen koivun jauhatuksen määrästä ja hyllyn osuudesta. Männyn putkimassaosuudella ja jauhatusmäärällä ei ole merkitystä suotautuvan veden määrään, mutta niillä on merkittävä yhteisvaikutus. Yhteisvaikutuksen mukaan on edullista käyttää puolikuivaa mäntyä ja jauhaa sitä 180 kWh/t. Kuvassa 24 esitetyn yläviiraveden vastetaulun perusteella tehokkain tapa lisätä yläviiran vettä on koivun jauhatuksen määrän lisääminen.



Kuva 24. Yläviiraveden vastetaulu.

On-line mittarilla poikkiradasta mitattuun flokkivahvuuteen saadaan samat muuttujat merkitseviksi kuin optisella formaatiomittarilla mitattuun paperin formaatioon. Pienen flokkivahvuuden saavuttamiseksi tulisi koivua jauhaa 80 kWh/t ja käyttää hylkyä 43 % sekä huomioida männyn kuivatushistorian ja jauhatuksen määrän yhteisvaikutus.

Höyryn kulutukseen ei taulukon 25 perusteella voida sanoa millään tutkitulla muuttujalla olevan suurta merkitystä, koska 89 % riippuu kokeen ulkopuolisista tekijöistä.

Hyöryn kulutuksen huonot merkitsevyydet johtuvat siitä, että koepisteiden väli oli yksi konerulla (n. 45 min) ja siinä ajassa muutokset eivät ehtineet tasaantua.

15.6 Yhteenveto

Jauhatusvaiheiden välistä otetut koivu- ja mäntynäytteet tukivat kartoitus- ja pilotkoeajon tuloksia. Mäntymassamäärittämisestä oli havaittavissa mäntyperien kulumisen kartoitus- ja tehdaskoeajon välillä. Tuloksissa ei saatu myöskään merkittäviä eroja tehdasmittakaavassa mäntyputkimassan ja puolikuivan massan jauhautumiselle, kuten ei myöskään paperiteknisiin ominaisuuksiin.

Koivumassalla ominaisuudet kehittyivät eri linjoilla samalla tavalla (vaikka eri linjoilla on eri määrä jauhimia) EOK:n funktiona. Ominaisuuksien kehittymisnopeudessa EOK:n funktiona ei ollut myöskään eroja koivun kartoitus- ja tehdaskoeajojen välillä.

Perälaatikonäytteistä mitattuun freenekseen todettiin koivun jauhatuksella ja hylyn määrällä olevan suurimman merkityksen. Perälaatikkomassasta määritetyn miehitysluvun perusteella massan formaatiopotentiaali oli hienopaperille tyypillisellä tasolla. Tämän perusteella formaation parantamiseksi tulisi keskittyä viiraosan toiminnan optimointiin.

Tuoteanalyysin perusteella kopiopaperin tärkeimpään lujuusominaisuuteen, taivutusjäykkyyteen, vaikutti tutkituista muuttujista eniten putkimassan osuus. Suurimman taivutusjäykkyyden saavuttamiseksi tulisi vastetaulun perusteella käyttää 100 %:sti mäntyputkimassaa, jauhaa koivua 80 kWh/t ja käyttää hylkyä 23 %.

Kaikkien kopiopaperin tärkeiden rakenneominaisuuksien (huokoisuus, formaatio ja karheus) kannalta koivun jauhatuksen määrä oli merkitsevin tekijä, ja jauhaminen tasolla 80 kWh/t oli ominaisuuksien kannalta edullisinta. Huokoisuuden kannalta myös hylyn suuri määrä oli edullista. Optisiin ominaisuuksiin tutkituilla muuttujilla ei saatu merkitsevyyksiä, mikä johtui prosessissa käytettävistä täyte- ja lisäaineista.

Yläviiraveden määrä on tutkituista koneolosuhteista pohjan muodostuksen kannalta tärkeä tekijä. Yläviiraveden lisäämiseksi tehokkaimmat tavat ovat koivun jauhatuksen ja hylyn määrän lisääminen. Paperista on-line mittarilla mitattuun flokkivahvuuteen

vaikuttavat samat tekijät kuin yläviiraveden määrään. Yläviiraveden määrällä ja flokki-vahvuudella on siis selvä yhteys.

Tehdaskoeajon tulokset tukivat pilotkoeajosta saatuja tuloksia, joiden mukaan kopio-paperin tärkeiden ominaisuuksien mukaan koivua tulee jauhaa paljon, n. 80 kWh/t (ei välttämättä optimi). Männyn osalta tehdaskoeajon tulokset eivät olleet aivan yhtä selviä, mutta tärkeimpien ominaisuuksien (mm. taivutusvastus, huokoisuus ja formaatio) suhteen mäntyä tulee jauhaa tehdasolosuhteissa 180 kWh/t.

Tehdaskoeajossa ei saatu myöskään putkimassaosuudella suuria eroavaisuuksia paperista mitattuihin ominaisuuksiin. Ainoastaan taivutusjäykkyyteen ja ilmastoinnin jälkeiseen kupruuntumiseen sillä on merkittävää vaikutusta. Koneolosuhteissa ei voitu myöskään havaita merkittäviä muutoksia massan vaihtuessa puolikuivasta putkimassaan.

16. TERIEN VAIHTOVÄLI

Diplomityön eräänä tavoitteena oli määrittää kriteerit terien vaihtovälille. Tehtaalla on käytössä terien aksaaliliikkeeseen perustuva terien kuluneisuuden mittausta. Aksaaliliikkeen kasvaminen kertoo terän korkeuden pienenemisestä, mutta se ei kerro mitään teräsärmän pyöristymisestä. Teräsärämä on ominaissärmäkuormateorian mukaan paikka, jossa suurin osa jauhatuksesta tapahtuu. Teräsärmän kunto voidaan todeta irroittamalla terät ja silmämääräisesti tarkastaa niiden kuluneisuus, mutta menetelmä on työläs ja lisäksi subjektiivinen.

Kirjallisuusosassa esitettiin, että kuluneella terityksellä joudutaan käyttämään huomattavasti enemmän jauhatusenergiaa jauhettaessa samaan freeness-tasoon. Tämän perusteella voidaan ajatella, että terien kuluneisuutta mitataan jauhimeen syötetyn puhtaan ominaisenergian kulutuksen aikaansaamalla freeneksen muutoksella eli

$$\Delta Fr = \frac{Fr_1 - Fr_2}{EOK} \quad (16)$$

missä	ΔFr	= Freeneksen muutos (ml t/kWh)
	Fr_1	= Jauhimeen syötettävän massan freeness (ml)
	Fr_2	= Jauhimesta tulevan massan freeness (ml)
	EOK	= Jauhimen puhdas ominaisenergian kulutus (kWh/t)

Tällä tavalla laskettuna tulos on suuntaa-antava, koska tulokseen vaikuttaa se, ettei freeness kehity jauhatuksen edetessä lineaarisesti. Myöskään erityyppisiä massoja, erilaisia jauhatusolosuhteita eikä erilaisia terityksiä voida verrata keskenään. Mutta tietyllä jauhimella ja samanlaisissa jauhatusolosuhteissa saatu tulos kertoo terien kulumisesta. Tosin samallakin jauhimella voivat sellun laadussa tapahtuvat muutokset vääristää tuloksia huomattavasti.

Taulukkoon 26 on laskettu eri koeajojen ja eri kuivatushistorian omaavien massojen freeneksen muutos kaavalla 16.

Taulukko 26. Mänty- ja koivujauhinten terien kuluneisuuden mittauss freeneksen muutoksella.

Koeajo	Massa	Kuivatushistoria	Teritys	Δ Fr, ml t/kWh		
				1. vaihe	2. vaihe	3. vaihe
Pilot	Mänty	Paali	LM-LM-LM	0,73	1,46	1,67
Kartoitus	"	Puolikuiva	BB-AA-BB	0,88	0,96	1,43
Pilot	"	"	LM-LM-LM	1,08	1,88	1,90
Tehdas	"	"	BB-AA-AA	-	0,55	0,76
Pilot	"	Putki	LM-LM-LM	1,33	1,67	2,71
Tehdas	"	"	BB-AA-AA	-	0,67	1,04
Kartoitus	Koivu	"	AA-MX	1,40	2,36	-
Pilot	"	"	MX-MX	2,42	2,42	-
Tehdas	"	"	AA-MX	1,39	2,76	-

Taulukosta 26 todetaan, että jauhatuksen edistyessä saadaan massa suuressa free- neksen muutos eli jauhautuminen nopeutuu. Tuloksista on luettavissa myös, että pilot- koeajossa kuivatun massajakeen osuuden vähentyessä free- neksen muutos suurenee. Männyn osalta voidaan lisäksi todeta, että jauhettaessa kuivatushistorialtaan samanlais- ta massaa on pilotjauhatusta tehokkain. Verrattaessa kartoitus- ja tehdasjauhatusta, saa- daan kartoitusjauhatuksella selvästi suurempi free- neksen muutos. Tulos vaikuttaa loo- giselta, koska terät olivat kuluneet myös massamäärittysten perusteella.

Koivulla on nähtävissä MX-terillä saatu samanlainen free- neksen muutos pilotjauhatuk- sessa ja tehtaalla suoritetuissa jauhatuksissa. Taulukko 26 osoittaa myös AA-terillä saatavan pienemmän free- neksen muutoksen.

17. JOHTOPÄÄTÖKSET HIENOPAPERIKONEEN JAUHATUKSEN OPTIMOINNISTA

17.1 Johtopäätökset

Työn perusteella voidaan kopiopaperin jauhatukseen antaa suositeltavat jauhatusmäärät, jos tärkeimpinä ominaisuuksina pidetään kuivauskuutistumaa ja huokoisuutta. Kuivauskuutistumalla on kopiopaperissa männyn jauhatusmäärällä selvä optimi. Koivun jauhatusmäärän kasvaessa kopiopaperin kuivauskuutistuma kasvaa. Paperin huokoisuuden männyn jauhatuksella ei ollut suurta merkitystä. Haluttu huokoisuus saavutetaan koivun jauhatusmäärällä, tosin kuivauskuutistuman kustannuksella. Taulukkoon 27 on kerätty kopiopaperin optimaaliset jauhatusolosuhteet kokeellisen osan perusteella.

Taulukko 27. Kopiopaperin optimaaliset jauhinterägeometriat ja jauhatusmäärät.

	Koivu	Mänty
Terägeometria	SC	LM
Jauhatusmäärä, kWh/t	70 - 90	120 - 140
Jauhatussakeus, %	4,5 - 4,7	4,1 - 4,3

Seuraavassa esitetään diplomityön perusteella tehdyt johtopäätökset:

- Siirtyminen LM-teritykseen nostaa mäntylinjan jauhatuskapasiteettia n. 25 %.
- Mäntymassan osittaisella kuivaamisella (50 % kuivattu kap. 80 %:iin ja 50 % kuivaamatonta) ei ole paperiteknistä merkitystä.
- Kiertävä vaihtojärjestys mäntyjauhinten terille tulisi ottaa käyttöön (ainakin kahden ensimmäiseen vaiheeseen).
- Koivujauhimissa tulee siirtyä käyttämään kaikissa jauhimissa aluksi MX-teritystä ja myöhemmin mahdollisesti SC-teritystä (varovainen jauhatustapa edullisin).
- Koivulinjalle 1 tulee hankkia lisäjauhin kasvavan jauhatusmäärän takia.
- Molemmilla koivulinjoilla tulee jauhaa samalla EOK:n määrällä massan homogeneenisen jauhatustuloksen saavuttamiseksi.
- Jauhatusta tulisi säätää vakio-EOK:n mukaan seuraten freenestä.

Tulosten perusteella männyn jauhatuksessa kannattaa siirtyä käyttämään LM-teritystä, jolla voidaan lisätä linjan jauhatuskapasiteettia pilottutkimusten perusteella n. 25 % tai säästää sähköä 40 kWh/t.

Työssä ei saatu kap. 80 %:iin kuivatulla mäntymassalla (osuus 50 %) putkimännyn (osuus 50 %) seassa hyötyä paperiteknisissä ominaisuuksissa tai paperikoneen ajettavuudessa.

Mäntylinjalla on mahdollista lisätä terien tehollista käyttöikää kiertävällä terien vaihtojärjestyksellä. Näin menetellen uudet terät asennetaan ensimmäisen vaiheen pumppaavaan jauhimeen. Tämän jälkeen teräsärmien pyöristyttyä jauhavalta puolelta, ne vaihdetaan toisen vaiheen pidättävään suuntaan pyörivään jauhimeen. Ensimmäisen vaiheen jauhimeen vaihdetaan vastaavasti uudet terät. Harkinnan mukaan terät voidaan vielä toisen vaiheen jälkeen vaihtaa kolmannen vaiheen pumppaavaan jauhimeen.

Koivulinjoilla tulee siirtyä käyttämään aluksi MX-teritystä, koska niitä on tehtaalla. Mikäli näillä terillä ei ole läpäisyn kanssa ongelmia, niin jatkossa tulee harkita siirtymistä vielä hienompaan SC-teritykseen. Koivulinja 2:lle tulee hankkia lisäjauhin jauhatusmäärän kasvamisen seurauksena (huomioitava myös terän vaihdot). Koivun jauhatusmäärän suuri merkitys tulee huomioida. Koivulinjoilla tulee jauhaa molemmilla linjoilla samalla EOK:n määrällä, joilloin saadaan ominaisuuksiltaan homogeenisintaa massaa.

Jauhatusta tulisi säätää pääasiassa vakio-EOK:n mukaan. Mikäli jauhettavan massan jauhavuudessa tapahtuu muutoksia, tulisi EOK:n tavoitetasoa nostaa tai alentaa kyseisen tilanteen mukaan. Tavoite EOK-määräytyy paperin huokoisuuden mukaan, johon vaikuttaa myös käytetyn hylyn määrä.

17.2 Jatkotoimenpide-ehdotuksia

Seuraavassa on esitetty ehdotuksia mahdollisiksi jatkotoimenpiteiksi.

- Tulisi selvittää osittain kuivatun mäntymassan optimi kuiva-ainepitoisuus ja osuus putkimäntymassan seassa.
- Selvittää haitallinen Ca^{2+} -ionipitoisuus jauhatuksessa ja keinot pitoisuuden vähentämiseksi.
- Kokeilla katkovampaa teritystä viimeisessä jauhatusvaiheessa.

Massan kuivaamisella kap. 90 % on kiistaton dimensiostabiliteettia parantava vaikutus. Jatkotutkimuksissa tulisikin selvittää, mihin kuiva-ainepitoisuuteen mäntymassa tulee

kuivata (jollei kap. 90 %), jotta kuivauksesta on merkittävää hyötyä paperin valmistuksessa. Lisäksi tulisi selvittää kuinka paljon tällaista massaa pitää käyttää putkimassan seassa, että sillä saavutetaan halutut ominaisuudet.

Kirjallisuuden ja Ca^{2+} -ionipitoisuuden selvityksen perusteella jauhatuksessa vallitsevalla vapaalla Ca^{2+} -ionipitoisuudella on haitallinen vaikutus massan jauhatutumiseen. Jatkotutkimuksessa tulisi selvittää millaisissa pitoisuuksissa Ca^{2+} -ioni rupeaa haitallisesti vaikuttamaan ja miten sen haittavaikutuksia voitaisiin vähentää.

Katkovan jauhatusvaiheen käytöllä männyn viimeisessä jauhatusvaiheessa saatiin kopiopaperimassakoostumuksen sisältävän paperiarkin huokoisuus ja kuivauskutistuma pienemmäksi sekä formaatiopotentiaali paremmaksi verrattuna arkkiin, jossa kaikki mäntyvaiheet oli jauhettu fibrilloivalla terityksellä. Aluksi voisi kokeilla katkovana terityksenä tehtaalla olevia BB-teriä. Ne antavat huomattavasti rajumman jauhatuksen OSK:lla ja OPK:lla mitattuna kuin LM-terät. Jatkossa voidaan harkita TM-terityksen kokeilemista.

17.3 Muita huomioita

Muita huomionarvoisia seikkoja, joihin diplomityötä tehdessä nuosi esille:

- Terän vaihtovälit tiuhemmiksi
- Kuluneella mäntyterityksellä tulee jauhaa täydellä teholla (180 kWh/t)
- Jauhinten pyörimisnopeudet ja -suunnat todettiin oikeiksi
- Perälaatikomassan formaatiopotentiaali todettiin hienopaperille tyypilliseksi
- Ominaisärmäkuormateorian puutteellisuus jauhatuksen hallinnassa
- Teräsuositusten jälkeen ominaisärmäkuormat ovat teorian mukaisia
- Huokoisuus mittausta pintaliimaamattomasta paperista

Jatkossa tulisi kiinnittää entistä suurempi huomio terien vaihtoväliin. Terässä voi olla aksaaliliikkeellä mittuna teräkorkeutta jäljellä, mutta teräsarmat pyöristyneet, jolloin ne eivät jauha. Ohjeellisena kriteerinä terien vaihdolle voidaan käyttää jauhimeen syötetyn puhtaan ominaisenergian kulutuksen aikaansaamaa freeneksen muutosta. Jauhatuksen tarkoitus on **optimoida massan laatu, eikä terän käyttöikä**.

Perälaatikkomassasta määritetty miehitysluku oli samalla tasolla kuin kirjallisuudessa on hienopaperimassalle esitetty. Tämän perusteella todettiin vedenpoistokaluston optimoinnin tarve formaation parantamiseksi.

Työssä tuli esille ominaissärmäkuormateorian puutteellisuus arvioitaessa jauhatustapaa. OSK-teorian rinnalla tulisi käyttää ominaispintakuormateoriaa, joka huomio paremmin terägeometrian rakenteen, teräsärmän leveyden.

Tällä hetkellä jauhatusta säädetään pitkälle valmiista pintaliimatusta paperista mitatun huokoisuuden perusteella. Jauhatuksen säädön kannalta ongelmana on pitkä viive tuloksen saamisessa ja pintaliimauksen jauhatustulosta vääristävä vaikutus. Mikäli paperin huokoisuutta halutaan käyttää jauhatuksen säätöön, niin se tulee mitata pintaliimamattomasta paperista. Vaihtoehdosi tulee tällöin on-line huokoisuuden mittausta ennen liimapuristinta.

18. TULOSTEN TARKASTELUA

Tulosten luotettavuuden arvioimiseksi esitetään koejärjestelyjen mahdolliset virhelähteet sekä niiden todennäköiset vaikutussuunnat mittaustuloksiin.

Paperikoneella käytettävän putkimassan laatuvariaatiot (perinnäinen tilasuure) on suuri hajonnan aiheuttaja, mutta sen vaikutussuuntaa ja suuruutta koeajojen tuloksiin on lähes mahdoton arvioida (koivun lähtöfreenokset eri koeajoissa). Jauhimisessa tapahtuvat muutokset ajan kuluessa (terien kuluminen, terien vaihdot jne.) aiheuttavat myös hajontaa tuloksiin. Tämä hajonta on kuitenkin oletettavasti melko pientä silloin, kun näytteet otetaan lyhyellä aikavälillä (kartoituskoeajot). Mikäli näytteiden välillä on pitkä väli on kulumisen aiheuttama jauhatusvaikutuksen pieneneminen odotettavissa (kartoituskoeajon ja tehdaskoeajon 5 kuukauden aikaväli).

Jauhatuksen prosessisuureiden (pH, sakeus, Ca^{2+} -ionipitoisuus, massavirtaus jne.) variaatiot ovat selviä hajonnan aiheuttajia. Prosessisuureista etenkin koivun jauhatussakeudella todettiin suuri vaikutus jauhatustulokseen. Kartoituskoeajojen jauhatussakeudet olivat keskenään lähes samat, mutta tehdaskoeajossa koivun jauhatussakeus oli korkeampi, mistä todennäköisesti seurasi, ettei koivuterien kuluminen näkynyt juurikaan tuloksissa. Pilotkoeajossa männyn märkinä toimitettujen massojen jauhatussakeus oli 1,0 % -yksikön pienempi kuin tehtaalla, mutta alhaisen jauhatussakeuden merkitys jauhatustulokseen on kyseenalainen, koska sakeuskoeajon perusteella männyn jauhatussakeudella ei ollut suurta merkitystä. Pilotkoeajossa jauhetun paalimassan Ca^{2+} -ionipitoisuus oli todennäköisesti alhaisempi kuin putkimassan ja puolikuivan massan, koska paalimassaa ei otettu prosessista. Paalimassan pH säädettiin lisäksi NaOH:lla, joka teorian mukaan tämä nopeuttaa massan jauhautumista, mutta tuloksissa paalimassa jauhautui edelleen selvästi hitaimmin.

Myös paperiarkkien valmistus arkkimuotilla ja varsinkin kopiopaperimassaseoksen valmistaminen ovat mahdollisia hajonnan aiheuttajia, mutta näidenkin virhelähteiden vaikutusta ja suuruutta on vaikea arvioida.

Diplomityön kaikissa koeajoissa jauhimita otettujen massanäytteiden perusteella piirrettiin kuvaajia, joissa tutkittu tilasuure kehittyy EOK:n funktiona. Piirrettäessä ominaisuuksia EOK:n funktiona voi häviötehon mittausta tehdasjauhimien ja pilotjauhimen välillä aiheuttaa heittoa puhtaasti EOK:n määrään. Kuvaajien perusteella eri ominaisuuksien kehittyminen on kuitenkin teorian mukaista, vaikka kehittymisnopeuksissa on

suuria eroavaisuuksia, johtuen erilaisista kokeessa käytetyistä muuttujista. Tulosten perusteella voidaan jauhatussarjojen todeta onnistuneen hyvin ja tulosten olevan luotettavia.

Hienopaperimassakoostumuksen sisältämille arkeille määritettiin regressiomallit koi-vun ja männyn jauhatuksen määrien ja tuotteen tilasuureiden välille. Regressiomallien avulla piirrettiin käyrästöjä, joita käytettiin tulosten arviointiin. Suunnitelman heikkou-tena oli koetoistojen puuttuminen, joiden avulla olisi pystytty selvittämään prosessin ja mittauksen perushajonta. Tulosten tilastollisen merkitsevyyden toteaminen olisi vaati-nut mallin selitysasteen (R^2) lisäksi kokeen perushajonnan ja regressiomallien jäännös-hajonnan vertaamisen. Tulosten luotettavuuden toteaminen jäi nyt pelkkien regressio-mallien selitysasteiden varaan, mitkä tosin olivat malleissa korkeita. Selitysasteet ku-vaavat osittain kokeen luotettavuutta.

Tehdaskoeajon koesuunnitelmassa käytettiin Taguchi-menetelmää. Tulokset analysoi-tiin Labpartner-tietokoneohjelmaan sisällytetyllä varianssianalyysillä (ANOVA). Tie-tokoneohjelmaan oli lisätty automaattinen confidenssi eli merkitsevyysanalyysi, joka antoi tutkituille muuttujalle luotettavuusvälit. Tehdaskoeajossa ei käytetty ulkomatrii-sia, joten ei ollut mahdollisuutta tutkia prosessin häiriötekijöiden vaikutuksia tulosten hajontaan (signaali - kohinasuhteeseen).

Tehdaskoeajon suurimpana virhelähteenä oli männyn jauhatuksen määrän vaihtelut eri koepisteissä, mikä näkyy tulosten merkitsevyyksissä männyn osalta. Toisaalta voidaan ajatella, että mäntymassalla 30 kWh/t oli liian pieni tasoero. Vastetaulujen perusteella tulkitut optimitasot voivat myös olla virheelliset, koska menetelmä ei huomioi tasojen välille mahdollisesti sijoittuvaa optimikohtaa.

Kaikkiin mitattuihin ominaisuuksiin vaikuttavat lisäksi mittausmenetelmien virheet se-kä inhimilliset tekijät. Näitä pyrittiin vähentämään standardin mukaisilla määrittelyksillä sekä rinnakkaismäärittelyksillä. Rinnakkaismäärittelysten hajonnat on esitetty tulosten yhte-yksissä. Kaikki mahdolliset virhelähteet huomioitaessa voidaan diplomityön tuloksia kokonaisuudessaan pitää luotettavina.

19. KOKEELLISEN OSAN YHTEENVETO

Kokeellisen osan tavoittena oli selvittää aluksi kartoituskoeajoilla uusitun jauhatusjärjestelmän toiminta. Tämän jälkeen pilotkoeajolla selvitettiin erityyppisten terägeometrioiden soveltuvuutta kopiopaperin raaka-aineena käyttävän koivu- ja mäntymassan jauhatukseen. Pilotkoeajolla selvitettiin myös männyn kuivatushistorian merkitys massan jauhautuvuuteen ja paperitekniisiin ominaisuuksiin. Tehdaskoeajon esikokeilla haettiin optimaalinen jauhatussakeus koivu- ja mäntymassalle sekä selvitettiin pH:n ja vapaan Ca^{2+} -ionin pitoisuudet jauhatuksessa. Tehdaskoeajolla selvitettiin tehdasmittakaavassa koivun ja männyn jauhatusmäärien, putkimassaosuuden ja hylyn määrän merkitystä lopputuotteeseen. Kerätyn aineiston perusteella pyrittiin lopuksi määrittämään kriteerit terien vaihtovälille.

Kartoituskoeajojen perusteella todettiin normaalitilanteessa massojen olevan tasalaatuisia (lukuunottamatta eroja vaaleuksissa) ja jauhautuvan paperitekniisten ominaisuuksien suhteen teorian mukaisesti. Tämän perusteella koeajon tuloksien voitiin todeta kuvaavan jauhimien toimintaa ja tuloksia voidaan pitää myöhempien koeajojen referenssinä.

Sakeuskoeajossa pidettiin jauhatustavat ja -määrät vakioina. Tuloksien perusteella sekä mänty- että koivumassan jauhatussakeuden nostamisella on massan jauhautuvuutta lisäävä vaikutus mitattuna millä tahansa massan tai paperiarkin ominaisuudella. Koivun jauhatussakeudella oli tosin huomattavasi suurempi merkitys. Koivun jauhatussakeuden nostaminen 3,8 %:sta 4,7 %:iin lisäsi mm. ilmanläpäisyvastusta (Gurley) 4,8 s/100 ml:sta 10,2 s /100 ml:aan.

Jauhatuksessa vapaan Ca^{2+} -ionipitoisuuden todettiin vaihtelevan melkoisesti eri näytteenottohetkillä. Pitoisuudet vaihtelivat männyllä välillä 47 - 65 mg/l ja koivulla 15 - 49 mg/l. Kirjallisuudesta saatavan tiedon perusteella pitoisuuksilla todettiin olevan vaikutusta massan jauhautumiseen. Koivu- tai mäntymassan vapaan Ca^{2+} -ionipitoisuuden ei todettu nousevan tai pH:n laskevan jauhatuksen edistyessä, mikä olisi ollut seurausta kuidun pinnan rikkoutuessa vapautuvasta valkaisusta peräisin olevasta happamuudesta.

Pilotkoeajossa kuivatushistorialtaan kolmen erilaisen mäntymassan jauhautuvuudessa todettiin kap. 90 %:iin kuivatun paalimassan erottuvan putkimassasta ja puolikuivasta massasta. Putkimännyn ja puolikuivan mäntymassan jauhutumisessa ei todettu käytännössä eroja jauhautuvuudessa eikä paperiteknisissä ominaisuuksissa. Mutta

verrattaessa mitä tahansa pilotjauhettua mäntymassaa, kuivatushistoriasta riippumatta, kartoituskoeajoissa tehtaalla jauhettuihin massoihin, todettiin tehdasjauhettujen massojen huono jauhautuminen kaikkien tutkittujen ominaisuuksien suhteen.

Mäntymassasta määritettyjen ominaisuuksien perusteella voitiin todeta, että LM tyyppisillä hyväkuntoisilla terillä on mahdollista vähentää merkittävästi mäntylinjan energian kulutusta n. 45 kWh/t tai vastaavasti lisätä jauhatuskapasiteettia n. 25 %. Katkovalla TM-terityksellä männyn kolmannessa vaiheessa, voitiin kopiopaperimassan formaatiopotentiaalin todeta selvästi parantuvan, ilmanläpäisyvastuksen kasvavan ja kuivauskutistuman pienenevän verrattuna LM-terityksellä jauhettuun samanlaiseen massaan.

Koivun pilotkoeajon tulosten perusteella eri terägeometriolla ei ollut yhtä suurta merkitystä massan jauhautuvuuteen kuin männyllä. Kopiopaperin pienen kuivauskutistuman kannalta SC-terityksen käyttö on kuitenkin edullisinta. Koivun ominaisuuksien (varsinkin ilmanläpäisyvastuksen) kehittymisen kannalta jauhatusmäärä on ratkaisevin.

Tehdaskoeajon tulokset tukivat aikaisempia koeajoja. Paperimääritysten eikä koneolosuhteiden perusteella saatu merkittäviä eroavaisuuksia putkimännylle ja puolikuivalle männylle. Kopiopaperin tärkeiden ominaisuuksien suhteen tulee koivu jauhaa varoista jauhustapaa käyttäen verraten pitkälle noin 80 kWh/t (ylempi taso, mutta ei välttämättä optimi). Männyn tulokset eivät olleet yhtä selviä, mutta tärkeimpien ominaisuuksien suhteen sitä tulee jauhaa tehtaalla käytetyillä terillä 180 kWh/t. Hylyn määrä menee useimpien ominaisuuksien kanssa ristiin mm. huokoisuuden ja formaation kannalta on edullista käyttää paljon hylkyä, mutta taivutusjäykkyyden kannalta on edullista käyttää pieni määrä hylkyä. Käytännössä hyllyn määrä tulisi vakioida.

LÄHTEET

1. **KCL** tiedote 110
2. Kymmene Corporation. Business Environment Report. Fine and Publication Paper Market Outlook 2/1995.
3. **NORDMAN, R.**, suullinen tiedonanto. 12.7.1995.
4. **RYTI, N.**, Paperimassojen hyvyyden luonnehtiminen. Paperin valmistus, osa 1. Toim. A. Arjas. Julk. SPIY/TTA. Turku 1983. S. 345-359.
5. **RECHER, M.**, Fine paper printing problem. 80th Annual Meeting. Preprints A. Montreal, February 1-2, 1994. Technical section CPPA. S. A327-A331.
6. **CHARLES, J., GREEN, Jr.**, Functional paper properties in xerography. Tappi 64(1981)5, s. 79-81.
7. **SUOJALEHTO, E.**, Vaalean puuvapaan painovärin opasiteetin säilyttäminen neliömassan laskiessa. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. Espoo 1988. 99 s.
8. **COLLEY, J.**, Copy paper-essential quality requirements. Appita 41(1987)1, s. 12-15.
9. **KCL** julkaisematon.
10. **KCL** seloste 2024.
11. **SELDIN, I.**, In search of the perfect copy paper. Pima 66(1984)6, s. 50-52.
12. **LYNE, M. B.**, Paper requirements for non-impact printing. International Printing and Graphic Arts Conference. Washington D.C. October 16-19, 1988. TAPPI. S. 87-89.
13. Deutsche Norm DIN 19309. Papier für Kopierzwecke, 80 g/m² Papier, unbeschichtet, Anforderungen, Pruefung; Deutsches Institut für Normung, 1990, s. 1-4.
14. **JOHANSSON, M.**, suullinen tiedonanto. 12.7.1995.
15. **PAULAPURO, H.**, Paperinvalmistusprosessin vaikutus paperin rakenteeseen. Puu-21.118. Kuitu- ja paperifysiikka. Otaniemi 1990. 47 s.
16. **KCL** seloste 2048.

18. **SALMEN, L., BOMAN, R., FELLERS, C., HTUN, M.,** The implications of paper and sheet structure for the hygroexpansivity of paper. Nordic Pulp and Paper Journal 2(1987)4, s. 127-131.
19. **RUTHLAND, D. F.,** Dimensional stability and curl of paper. 71st Annual Meeting. Preprints A. Montreal, January 29-30, 1985. Technical Section CPPA. S. A277-A283.
20. **UESAKA, T.,** Dimensional stability of paper: Upgrading paper performance in end use. Journal of Pulp and Paper Science 17(1991)2, s. J39-J44.
21. **WATANABE, M., SAWA, Y., ABE, Y.,** Study on the heat contraction behavior of paper. Appita Journal 44(1991)3, s. 205-208.
22. **VIITAHARJU, P.,** Käyristymisen hallinta. 1994. INSKO. Julkaisu P901801/94 VIII. Kuitu- ja paperifysiikan soveltaminen. 20 s.
23. **LEBEL, R., STRADAL, M.,** Control of fine paper curl in papermaking. Pulp & Paper Canada 83(1982)6, s. 112-117.
24. **PAKARINEN, P.,** Kuituorientaatio ja anisotropia. 1994. INSKO, Julkaisu P901801/94 VI. Kuitu- ja paperifysiikan soveltaminen. 23 s.
25. **KCL PSC Communications** 41.
26. **JOKINEN, O.,** Tutkimus kuitususpension flokkaantumistaipumukseen vaikuttavista tekijöistä. Lisensiaattityö, Teknillinen Korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. Espoo 1984. 90 s.
27. **EBELING, K.,** Rainauksen perusmekanismit. 1986. INSKO, Julkaisu, 112-86. Rainaus ja märkäpuristus. 27 s.
28. **KIVIRANTA, A.,** Formaatio: Syntymekanismit ja vaikutukset. 1994. INSKO, Julkaisu P901801/94 V. Kuitu- ja paperifysiikan soveltaminen. 18 s.
29. **MANSON, D.,** The practical aspects of formation. 1994 wet end operations short course. Cincinnati, OHIO May 9-13, 1994. TAPPI. S. 23-35.
30. **EGELHOF, D., BUBIK, A.,** Der Einfluss des Maschinenbaus auf die Blattbildung. Wochenblatt für die Papierfabrikation 122(1994)4, s. 111-117.
31. **DODSON, C.T.J., SCHAFFNIT, C.,** Flocculation and orientation effects on paper-formation statistics. Tappi Journal 75(1992)1, s. 167-171.
32. **KEREKES, R.J., SCHELL, C.J.,** Characterization of fibre flocculation regimes by a crowding factor. Pulp & Paper Science 18(1992)1, s. J32-J38.

33. **PAAVILAINEN, L.**, Importance of coarseness and fiber length in papermaking. International process and product quality conference. Savannah, October 23-26, 1989. S. 99-109.
34. **ARJAS, A.**, Tehdasjauhimen toiminnan arviointi. Helsinki 1971. INSKO, Julkaisu 22-70. 19 s.
35. **LUMIAINEN, J.**, Refining intensity at low consistency-critical factors. Paper Technology 32(1991)11, s. 22-26.
36. **LUMIAINEN, J.**, Kuituraaka-aineiden tehdaskäsittely ja laitteistot. Osa 2. Jauhatus. Porvoo 1991. INSKO, Julkaisu 105-91 VIIb. Puusta paperiksi - paperin valmistus. 21 s.
37. **EBELING, K.**, A critical review of current theories for the refining of chemical pulps. International Symposium on Fundamental Concepts of refining, Preprint. Appleton, Wisconsin, September 16-18, 1980. 36 s.
38. **HIETANEN, S., EBELING, K.**, Heterogeneity in refining action; effects on fiber and paper structure. 1983 International Paper Physics Conference. Harwichport, Ma., September, 1983. TAPPI. S. 27-39.
39. **REEVES, H., R., CANON, J., H.**, Refining and refiner control systems. 1994 Stock Preparation Short Course. San Francisco, April 27-29, 1994. TAPPI. S. 103-131.
40. **RYTI, N.**, Paperitekniiikan perusteet. Otakustantamon moniste nro 289. Espoo 1989. 169 s.
41. **HIGGINS, H. G., DE YONG, J.**, The beating process: primary effects and their influence on pulp and paper properties. In Bolam's formation and structure of paper. Trans. of the Symposium. Oxford, september 1961. Tech. Sect. of the Brit. Paper and Board Makers' Assoc. London 1962. S. 651-690.
42. **FAHEY, M. D.**, Mechanical treatment of chemical pulps. Tappi 53(1970)11, s. 2050-2064.
43. **ATTACK, D.**, In fibre-water interactions in paper-making. Trans. of the Symposium. Vol I. Oxford, september 1977. Fund. Res. Comm., Brit. Paper and Board Ind. Fed. London 1978. S. 261-295.
44. **CLARK, J.**, Pulp technology and treatment for paper. Miller Freeman Pub. Inc., San Francisco, 1978. 752 s.
45. **EBELING, K.**, Jauhatuksen vaikutus puukuituihin. Paperin valmistus, osa 1. Toim. A. Arjas. Julk. SPIY/TTA. Turku 1983. S. 67-99.

46. **LEVLIN, J. -E.**, Jauhatuksen vaikutus kuidun, sulpun ja paperin ominaisuuksiin. 1982. INSKO, Julkaisu 74-82. Paperimassan jauhatus. 29 s.
47. **EBELING, K., LEVLIN, J-E., NORDMAN, L.**, Kuitujen rakenteen vaikutus massan paperitekniisiin ominaisuuksiin. Puukemia. Toim. W. Jensen. Julk. SPIY/TTA. Turku 1977. S. 214-227.
48. **LEVLIN, J. -E., JOUSIMAA T.**, New pulps require new refining techniques. Paper Technology & Industry 29(1988)6, s. 304-312.
49. **GIERTZ, R. P.**, The Cellulose - Water - System and the influence of fibrillation and fines on the consolidation of paper. Helsinki 1987. INSKO, Julkaisu 98-97/IV. 6 s.
50. **HIETANEN, S.**, Flokkisuuden merkitys jauhatuksessa; tutkimus uuden jauhatusperiaatteen sovellettavuudesta. Lisensiaattityö. Teknillinen Korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. Espoo 1985. 162 s.
51. **HIETANEN, S., EBELING, K.**, A new hypothesis for the mechanics of refining. Paperi ja Puu 72(1990)2, s. 172-179.
52. **SYRJÄNEN, A.**, Paperimassan jauhatus. Helsinki 1976. INSKO, Julkaisu 20-76. 17 s.
53. **BRECHT, W., SIEWERT, W.**, Zur Theoretisch-technischen Beurteilung des Mahlprozesses moderner Mahlmaschinen. Das Papier 20(1966)1, s. 4-14.
54. **LUMIAINEN, J.**, Conflo-jauhinkonsepti ja ominaissärmäkuormateorian tarkastelu. Paperi ja Puu 72(1990)7, s. 652-657.
55. **DANFORTH, D., W.**, Stock preparation: theory/practice. Southern Pulp and Paper Manufacture 32(1969)7, s. 52-53.
56. **STEVENS, W., V.**, Refining analysis offers improved system efficiency, horsepower usage. Pulp & Paper 55(1981)3, s. 64-67.
57. **KEREKES, R.**, Characterization of pulp refiners by a C-factor. Nordic Pulp and Paper Research Journal (1990)1, s. 3-8.
58. **HIETANEN, S., EBELING, K.**, Fundamental aspects of the refining process. Paperi ja Puu 72(1990)2, s. 158-170.
59. **LUMIAINEN, J.**, A new approach to the critical factors effecting refining intensity and refining result in low-consistency refining. Papermakers Conference. Atlanta, April 23-25, 1990. TAPPI. S. 269-278.
60. **NORDMAN, L.**, Paperikuitujen mekaaniset ominaisuudet ja niiden mittaaminen. Puu-21.118, kuitu- ja paperifysiikka. Otaniemi 1990. 33 s.

61. **DILLNER, B., TIBBLING, P.**, Isothermal cooking to low kappa numbers facilitates TCF bleaching to full brightness. Non-Chlorine bleaching conference. Hilton Head, USA, March 15-18, 1993.
62. **SARANTOLA, J.**, Jauhatuksen suunnittelu ja mitoitus. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. Espoo 1981. 132 s.
63. **MOHLIN, U.-B.**, Cellulose fibre bonding. Part 3. The effect of beating and drying on interfibre bonding. Svensk Papperstidning 78(1975)9, s. 338-341.
64. **MÄKELÄ, P.**, Sellun kuivatushistorian vaikutus SC-paperin armeerausmassaominaisuuksiin. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. Espoo 1986. 73 s.
65. **TAAVITSAINEN, M.**, Hienopaperimassan jauhatuksen optimointi. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. Espoo 1981. 179 s.
66. **KURDIN, J. A.**, Stock preparation refining: open beaters evolve to disc machines. Pulp & Paper 59(1985)3, s. 97-100.
67. **MANFREDI, V., CLAUDIO-DA-SILVA, E. Jr.**, Refining-operational variables vs. raw materials. Advances in Refining Technologies. International Conference. New Technologies in Refining. Birmingham, December 9-11, 1986. PIRA. 40 s.
68. **BAKER, C. F.**, Good practice for refining the types of fibre found in modern paper furnishes. Papermakers Conference 1994 TAPPI 1994. S.127-135.
69. **CALDERON, P., SHARPE, P., RODARMEL, J.**, Refiner plate selection depends on environment and material costs. Pulp & Paper 62(1988)2, s. 152-159.
70. **LUMIAINEN, J.**, suullinen tiedonanto. 21.12.1994.
71. **KCL** seloste 1941..
72. **KCL** seloste 1975.
73. **LINDSTRÖM, T.**, Der Einfluss chemischer Faktoren auf Faserquellung und Papierfestigkeit. Das Papier 34(1980)12, s. 561-568.
74. **LINDSTRÖM, T., LJUNGGREN, S., DE RUVO, H., SÖREMARK, CH.**, Dissolution of carbohydrates and lignin during beating of kraft pulps. Svensk Papperstidning. 81(1978)12, s. 397-402.
75. **GRIGNON, J., SCALLAN, A.M.**, The effect of cations on pulp and paper properties. Svensk Papperstidning 82(1979)2, s. 40-47.

76. **PURI, V., GUHA, R., NEGI, J.**, Studies on beater additives: effect of xylan, CMC and semla on the properties of paper. *Indian Pulp & Paper* 29(1974)2-3, s. 3-5.
77. **LUMIAINEN, J.**, The Conflo refiner- a new concept for LC-refining. *Paper Technology* 32(1991)3, s. 26-34.
78. **EBELING, K.**, Jauhin hydraulisena koneena. 1982. INSKO, Julkaisu 74-82. Paperimassan jauhatus. 30 s.
79. **JOKISALO, H., SALOMÄKI, K.**, Matalasakeusjauhatus. Paperin valmistus, osa 1. Toim. A. Arjas. Julk. SPIY/TTA. Turku 1983. S. 426-435.
80. **LUMIAINEN, J.**, Plate pattern and fiber dimensions have an effect on the performance of the refiner. Engineering Conference. San Francisco, September, 19-22, 1994. TAPPI. S. 265-271.
81. **LUMIAINEN, J.**, Energy saving in low consistency refining. PITA Annual Conference 1991 - PAPEX 91 - ENVIRONMENT 2000. Manchester, October 29-30, 1991. PITA. 17 s.
82. **LUMIAINEN, J.**, The specific surface load, impact length, number of impacts, refiner geometry and fibre characteristics are the key factors in the refining system design. 4th International Conference: New Available Techniques and Current Trends. Bologna, May 19-22, 1992. SPCI, ATICELCA. S. 284-296.
83. **KCL** seloste 2142.
84. Puusta paperiksi M-504. Hienopaperin valmistus. METLAS KY. s. 146.
85. **HALME, M., SYRJÄNEN, A.**, Flow of stock in conical refiner observed by a high-speed film camera. Atti del Congresso Europeo Di Tecnica Cartaria. Venetsia, September 1964. S. 273-276.
86. **MÄKIVAARA, J.**, suullinen tiedonanto. 7.3.1995.
87. **GRANT, R.**, Looking towards a more refined future. *Pulp & Paper International* 34(1992)2, s. 48-49.
88. **ARJAS, A.**, Influence of residence time distribution on pulp properties. International Symposium on Fundamental Concepts of refining. Preprint. Appleton, Wisconsin, September 16-18, 1980. S. 139-148.
89. **KURDIN, J., A.**, Stock preparation with disc refiners. *Appita* 31(1977)2, s. 42-48.

90. **ARJAS, A.**, Residence time distributions in conical refiners and refining systems. International Symposium on Fundamental Concepts of refining, Preprint. Appleton, Wisconsin, September 16-18, 1980. S. 8-14.
91. **ARJAS, A.**, Selecting refiners, connecting them into a refining system and dimensioning the system. International Symposium on Fundamental Concepts of refining. Preprint. Appleton, Wisconsin, September 16-18, 1980. S. 190-196.
92. **SUNDHOLM, F.**, Hallintajärjestelmän kehittäminen eräille sellun jauhatuslinjoille. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos. Espoo 1990. 128 s.
93. **LEVLIN, J. -E.**, Constant vs. variable load during refining. International Symposium on Fundamental Concepts of refining. Preprint. Appleton, Wisconsin, September 16-18, 1980. S. 258-263.
94. **KARJALAINEN, E.**, Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelulla Taguchi-menetelmä. Metalliteollisuuden Keskusliitto, Tekninen tiedotus 25/90, 1990. 95 s.
95. **KARJALAINEN, E.**, Teollinen koesuunnittelu - esimerkkejä Suomessa toteutetusta kokeellisesta tuotteen ja prosessin suunnittelusta Taguchi-menetelmällä. MET, Tekninen tiedotus 9/92, 1992. 161 s.
96. **NIEMI, H.**, Taguchi-menetelmä. Vantaa 1994. AEL-INSKO, Julkaisu P900701/94 V. Tehdaskoeajot paperi- ja kartonkitehtaassa. 10 s.
97. **LAMMINMÄKI, T.**, Paperin kupruuntumisen mittaus KCL:n kupruilun analysaattorilla (OPSCO), KCL, 22.6.1995.
98. **MÄKIVAARA, J.**, Valkaistun mänty ja koivu sulfaatin jauhatus Claflin 303 ja JC-03 jauhimilla, Kymi Oy Kuusanniemi, PK 8 ja PK 9. Raportti. 22.1.1993.
99. **TAAVITSAINEN, M.**, Hienopaperimassan jauhatus. 1982. INSKO, Julkaisu 74-82. Paperimassan jauhatus. 29 s.

JYLHÄ CONFLO JC-03:n TEKNISET TIEDOT

Kapasiteetti	TPD	50 - 500
Teho alue	kW	250 - 900
Pyörimisnopeus alue	RPM	420 - 750
Sakeus alue	%	2 - 6
Max toiminta paine	kPa	600 (6 bar)
Paino (ilman moottoria)	kg	3700
Pituus (ilman moottoria)	mm	2350
Leveys	mm	1100
Korkeus	mm	1350

PK 9:n KARTOITUSKOEAJO 21.1.1995
Kartoituskoeajon A tulokset

Jauhatusolosuhteet	MÄNTY						KOIVU						SEOS	
	Jauhmaton		1. vaihe		2. vaihe		Jauhmaton		1. vaihe		2. vaihe		2. vaihe	
	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
Jauhimen teho, kW			400		390				415		415		0	
EOK kumul., kWh/t			57		109				53		53		0	
EOK:n jako, %			33		33				50		50		0	
OSK, J/m			6.5		3.4				3.2		3.2		0	
OPK, J/m ²			1118		802				760		760		0	
Massamäärittelykset	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
Sakeus, %	4.3		4.0		4.3		3.9		3.9		3.9		4.1	
SR-luku	13.0		15.0		18.0		16.0		21.0		20.5		21.5	
Freeness, ml	710		660		610		585		515		525		500	
pH	7.2		7.1		7.1		7.4		7.2		7.4		8.1	
Ca ² ,mg/l														
Kuidunpituus, mm	2.09		2.05		2.09		0.99		0.97		0.97		1.23	
Pituusmassa, mg/m	0.22		0.20		0.20		0.11		0.12		0.12		0.14	
Kuidun massa, 10-6* g	0.46		0.42		0.42		0.11		0.11		0.11		0.17	
Arkkimäärittelykset														
Neliömassa, g/m ²	71.1		72.3		70.8		71.9		73.1		72.6		70.4	
Rakenneominaisuudet														
Ilmanläpäisyvastus, s/100ml	0.5	0.0	1.3	0.2	2.4	0.1	1.6	0.1	5.3	0.6	5.8	0.9	7.3	0.4
Kuivauskutistuma, %	4.4	0.3	4.1	0.4	4.3	0.5	3.1	0.3	3.9	0.4	3.7	0.3	4.4	0.4
Tiheys, kg/m ³	415		463		515		505		580		573		565	
Paksuus, mm	670	8	625	36	550	2	567	5	504	2	507	8	498	2
Bulkki, kg/m ³	2.41		2.16		1.94		1.98		1.72		1.75		1.77	
Formaatioindeksi (opt.)	93.4		88.9		85.6		105.2		100.4		98.3		99.4	
Lujuusominaisuudet														
Vetolujuus, kN/m	22.1	0.5	44.2	1.3	57.2	1.7	49.0	1.2	70.3	2.2	68.8	3.8	65.4	2.2
Vetoindeksi, Nm/g	21.6		40.8		53.9		43.9		64.2		63.1		61.9	
Repäisyjujuus, mN	1089	178	1506	143	1212	70	616	51	622	2	629	14	737	29
Repäisyindeksi, mNm ² /g	15.31		20.84		17.13		8.56		8.52		8.66		10.47	
Lujuustulo	360		850		923		360		547		547		648	
Venymä, %	4.3	0.3	4.9	0.2	5.1	0.2	3.7	0.3	4.4	0.3	4.5	0.1	4.8	0.3
Puhkaisulujuus, kPa														
Puhkaisuindeksi, kPa m ² /g	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
Taivutusvastus, mN	51	7	62	9	58	8	67	6	65	11	68	10	62	5
Optiset ominaisuudet														
ISO-vaaleus, %	85.6	0.1	85.1	0.3	84.2	0.1	89.6	0.1	88.0	0.2	88.5	0.1	91.6	0.2
Opasiteetti, %	78.1		76.9		74.9		78.6		76.1		76.1		80.2	
Valonsirontakerroin, m ² /kg	35.6		32.3		29.9		37.9		32.5		32.9		36.1	

PK 9:n KARTOITUSKOEAJO 31.1.1995
Kartoituskoeajon B tulokset

Jauhatusolosuhteet	MÄNTY				KOIVU				SEOS	
	Jauhhamaton	1. vaihe	2. vaihe	3. vaihe	Jauhhamaton	1 1. vaihe	2 1. vaihe	2 2. vaihe	Sek. säiliö	
Jauhimen teho, kW		370	360	380		330	330	220		
EOK kok., kWh/t		46	94	142		57	42	68		
EOK:n jako, %		33	33	33		100	60	40		
OSK, J/m		6.0	3.1	6.1		2.5	2.6	1.0		
OPK, J/m²		1033	737	1055		600	608	292		
Massamäärittelykset										
Sakeus, %	4.8	4.4	4.2	4.4	4.0	4.0	3.9	4.1	4.1	
SR-luku	12.5	14.0	17.0	18.0	17.0	23.0	20.0	24.0	21.0	
Freeness, ml	710	685	650	600	560	470	500	470	510	
pH		8.0	8.0	7.7		6.9	6.7	6.7	8.6	
Ca², mg/l										
Kuidunpituus, mm	2.15	2.14	2.18	2.17	0.98	0.96	0.97	0.97	1.27	
Pituusmassa, mg/m	0.20	0.21	0.22	0.18	0.11	0.10	0.11	0.11	0.13	
Kuidun massa, 10-6* g	0.44	0.46	0.48	0.38	0.11	0.10	0.10	0.10	0.17	
Arkkimäärittelykset										
Neliömassa, g/m²	70.5	71.3	71.1	74.1	72.1	72.5	72.4	72.3	72.5	
Rakenneominaisuudet										
Ilmanläpäisyvastus, s/100ml	0.5	0.1	1.7	0.1	0.3	0.4	0.4	0.3	0.7	1.0
Kuivauskutistuma, %	4.4	4.1	4.2	4.7	3.5	4.0	3.7	4.3	4.3	0.4
Tiheys, kg/m³	414	474	513	538	524	588	562	604	597	
Paksuus, mm		601	554	550	544	493	515	479	486	5
Bulkki, kg/m³	2.42	2.11	1.95	1.86	1.91	1.70	1.78	1.66	1.68	
Formaatioindeksi (opt.)	90.5	87.9	90.5	81.9	105.4	100.6	101.1	102.1	96.2	
Lujuusominaisuudet										
Vetolujuus, kN/m	23.5	43.0	55.9	66.0	52.1	76.0	67.2	78.3	67.3	1.9
Vetoindeksi, Nm/g	23.1	40.2	52.5	59.4	46.3	69.9	61.9	72.2	61.9	
Repäisylujuus, mN	1267	1606	1391	1296	538	601	608	625	789	33
Repäisyindeksi, mNm²/g	17.97	22.53	19.59	17.51	7.46	8.28	8.41	8.65	10.88	
Lujuustulo	435	906	1028	1041	342	579	520	625	673	
Venymä, %	4.5	0.2	5.1	0.2	3.9	4.6	4.4	4.4	4.6	0.2
Puhkaisulujuus, kPa										
Puhkaisuindeksi, kPa m²/g	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Taivutusvastus, mN	56	62	57	62	67	68	62	71	61	8
Optiset ominaisuudet										
ISO-vaaleus, %	90.2	89.8	89.5	89.7	91.1	89.8	90.1	89.9	94.6	0.1
Opasiteetti, %	76.1	74.7	73.3	73.1	77.6	74.6	75.9	74.2	78.9	
Valonsirontakerroin, m²/kg	35.0	31.9	29.8	28.0	36.7	31.3	33.4	30.7	34.3	

PK 9:n KARTOITUS- JA TEHDASKOEAJOT
Paperimääritysten tulokset

	Kartoituskoeeajot						Tehdaskoeajot											
	21.1.			31.1.			12-13.6											
	A1	A2		B1	B2		KA1	KA2	KA3	KA4	KA5	KA6	KA7	KA8	KA9	KA10	KA11	KA12
Jauhatusolosuhteet																		
Männyn EOK		165,1		142,1			170	150	190	160	180	150	175	150				
Mänty putkimassan osuus		50		40			50	50	50	50	100	100	100	100				
Koivun EOK 1/2		53/53		57/68			55/50	53/50	81/85	58/53	52/51	75/78	75/80	35/65				
Koivumassan osuudet linoilla		50/50		40/60			45/55	45/55	35/65	45/55	45/55	45/55	35/65	35/65				
Hyllyn osuus		20,2		43,1			24	42	46	24	42	23	24	43				
Lujusdominaisuudet																		
Vetoisuus ks	4,83	0,2	4,92	0,3	5,66	0,2	5,55	5,73	5,62	5,47	5,35	5,63	5,70	5,47				
Vetolujuus ps	1,98	0,7	1,95	0,6	2,16	0,8	2,09	2,00	2,00	2,05	2,04	2,09	2,11	2,03				
Vetoindeksi ks	60,9		61,8		70,7		69,2	71,7	70,1	68,4	66,4	69,3	69,8	68,8				
Vetoindeksi ps	24,9		24,5		27,0		26,0	25,1	25,0	25,7	25,3	25,7	25,8	25,6				
Repäisyalue ks	643	9	557	17	590	21	568	556	40	580	16	544	18	539	30			
Repäisyalue ps	650	11	653	9	672	17	674	683	17	701	13	689	24	699	33	704	27	
Repäisyindeksi ks	6,85		7,00		7,37		7,09	6,96	6,83	7,25	6,75	7,18	6,74	6,79				
Repäisyindeksi ps	8,19		8,21		8,39		8,41	8,55	8,75	8,61	8,41	8,39	8,56	8,86				
Lujustulo ks	417		433		521		491	499	479	496	448	498	470	467				
Lujustulo ps	204		201		227		219	215	219	221	213	216	221	227				
Venymä ks	1,4	0,1	1,4	0,1	1,5	0,1	1,5	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,1			
Venymä ps	3,2	0,3	2,8	0,5	2,9	0,2	3,2	3,0	3,3	3,3	3,1	2,9	3,3	3,0	0,4			
Palsautumislujuus	196	7	168	8	201	7	181	201	9	257	12	212	9	233	11	229	8	
Pintalujuus IGT vp	0,75		0,70		0,75		0,80	0,80	0,75	0,70	0,70	0,95	0,70	0,80				
Pintalujuus IGT vp	0,70		0,60		0,50		0,50	0,65	0,65	0,55	0,55	0,60	0,50	0,50				
Taivutusjäykkyyks ks	104	5	94	26	115	4	100	89	109	108	5	117	6	120	5	120	3	
Taivutusjäykkyyks ps	52	4	48	3	52	3	47	43	4	45	3	56	3	49	4	50	4	
Opiker ominaisuudet																		
ISO-vaaleus vp	92,6	0,05	92,6	0,06	92,7	0,03	92,7	90,8	91,0	90,7	90,7	90,2	90,5	90,5				
ISO-vaaleus ps	92,6	0,13	92,8	0,08	92,8	0,03	92,8	91,1	91,3	91,1	90,9	90,6	90,9	90,9				
Whiteness vp	138,7		138,9		138,5		138,5											
Whiteness ps	136,9		137,0		137,6		137,6											
Opasiteetti	91,9		91,4		90,7		91,7	91,4	92,1	92,1	92,4	92,2	92,2	92,1				
Valonsironakerroin	57,7		56,0		53,5		57,6	57,2	59,2	59,1	59,6	52,4	55,3	56,0				
Valonabsorptio	0,64		0,60		0,55		0,56											
Rekenn- ja pintaominaisuudet																		
Neliömassa	79,4		79,6		80,1		80,2	79,9	80,1	80,0	80,3	81,2	81,7	79,5	0,3			
Paksuus	105	1	104	1	105	1	105	103	104	103	103	106	105	102	1			
Tiheys	0,756		0,765		0,764		0,767	0,779	0,771	0,775	0,777	0,763	0,780	0,780				
Bulkki	1,323		1,307		1,310		1,303	1,283	1,297	1,290	1,288	1,311	1,283	1,282				
Tuhka 500 C	23,2		22,5		22,8		23,5	23,0	22,1	23,3	23,5	22,8	23,3	24,7				
Tuhka 925 C	13,7		13,3		13,3		13,7	13,5	13,2	13,7	13,8	13,4	13,7	14,6				
Karheus vp	217	25	216	23	226	20	223	178	20	180	19	169	16	174	24	185	26	
Karheus ps	304	65	289	22	243	20	265	205	24	222	25	180	17	189	23	204	22	168
Huokoisuus Bend.	956	65	1023	65	875	46	851	1052	56	851	39	964	24	1039	63	1285	99	955
Huokoisuus Gurley	12	0	12	0	14	0	10	11	2	16	1	13	0	13	1	13	2	
Formaatio indeksi opt.	66,8		70,4		68,5		67,1	66,6	75,2	75,3	70,8	63,9	74,6	74,6				
Dimesdiostabiliteetti ks	0,15		0,12		0,12		0,11	0,10	0,10	0,10	0,00	0,10	0,11	0,00	0,09	0,01		
Dimesdiostabiliteetti ps	0,45		0,46		0,44		0,45	0,47	0,40	0,47	0,40	0,47	0,40	0,40	0,49	0,01		
Käyristyminen (lamppu) vp	18	1	19	1	17	1	21	17	4	15	1	16	3	25	0	18	4	18
Käyristyminen (lamppu) ps	24	0	23	0	25	0	25	25	0	25	0	25	0	25	0	25	0	24
Käyristyminen (kost.) vp																		
Käyristyminen (kost.) ps																		
Cocking	2,1		1,7		3,1		2,0											
							0,162	0,154	0,160	0,156	0,153	0,145	0,146	0,138				

PK 9:n JAUHATUSSAKEUSKOEAJO 11.5.1995
Koivu- ja mäntyjauhien sakeuskoeajon tulokset

Jauhatusolosuhteet		MÄNTY						KOIVU																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
		3.0	3.5	4.0	4.5	3.5	4.0	4.5	5.0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Sakeus, %		370	370	370	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	38

PK 9:n PILOTKOEAJON MASSOJEN TESTAUS 6 - 8.3.1995
Koivu- ja mäntymassojen PFI-jauhatusen tulokset

Jauhatusolosuhteet	MÄNTY				KOIVU			
	Paali	Puolikuiva	Putki	Putki ka.	haj.	Putki	Putki ka.	haj.
Hajotuskierroksia, r	30000	10000	10000	10000		10000	10000	
Jauhatuskierroksia, r	900	900	900	900		900	900	
Massamäärittelykset								
Alkuperäis kuiva-aine, %	86.9	3.4	4.6	13.0		4.4	12.1	
SR-luku	16.0	18.0	16.5	15.8	0.6	24.0	26.3	3.4
Freeness, ml	635	605	620	634	9	295	380	46
Kuidunpituus, mm	2.18	2.14	2.19	2.21	0.06	0.99	0.99	0.02
Arkkimäärittelykset								
Neliömassa, g/m ²	61.9	60.0	60.6	61.2	0.8	61.0	60.1	0.8
Rakenneseominaisuudet								
Ilmanläpäisyvastus, s/100ml	4.8	10.9	11.3	10.1	1.5	107.1	61.9	30.6
Tiheys, kg/m ³	722	768	788	781	11	862	851	11
Lujuusominaisuudet								
Vetoindeksi, Nm/g	62.0	77.0	83.5	79.5	3.1	102.9	95.9	4.0
Repäisyindeksi, m Nm ² /g	17.00	12.02	10.97	11.29	0.73	6.75	7.04	0.40
Lujuustulo	1055	926	916	897	61	695	675	36
Venymä, %	3.2	3.6	3.4	3.7	0.1	3.6	3.6	0.2
Puhkaisuindeksi, kPa m ² /g			6.4	6.1	0.3	6.6	6.2	0.3
Optiset ominaisuudet								
ISO-vaaleus, %	88.6	89.3	88.3	86.9	1.2	90.1	87.9	1.3
Opasiteetti, %	64.1	61.1	58.5	59.2	1.3	57.2	57.9	1.5
Valonsirontakerroin, m ² /kg	24.2	21.4	19.4	18.9	0.9	18.7	19.5	5.1

PILOTJAUHATUSTEN TULOKSET 7 - 9.3.1995
Männyn massamääritykset

	MÄNTY PUTKIMASSA										MÄNTY PAALIMASSA									
	Jauhamaton		1. vaihe		2. vaihe		3. vaihe		4. vaihe		Jauhamaton		1. vaihe		2. vaihe		3. vaihe		4. vaihe	
	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
Massamääritykset																				
Sakeus, %	3.2		3.1		3.1		3.2		3.1		3.9		4.1		3.9		4.1		4.0	
SR-luku	14.0		16.0		22.5		37.0		53.0		14.0		15.0		18.0		23.0		30.0	
Freeness, ml	690		610		510		350		240		685		650		580		500		410	
pH	5.9		5.8		6.0		6.0		6.2		6.3		6.2		6.2		6.2		6.2	
Ca++ pitoisuus, mg/l																				
Kuidunpituus, mm	2.05		2.04		1.93		1.78		1.66		2.03		2.08		2.02		1.97		1.97	
Pituusmassa, mg/m	0.22		0.20		0.19		0.20		0.17		0.20		0.21		0.22		0.22		0.22	
Kuidun massa, 10 ⁻⁶ *g	0.44		0.40		0.37		0.35		0.28		0.41		0.44		0.44		0.43		0.43	
Arkkimääritykset																				
Neliömassa, g/m²	70.0		71.4		69.9		69.8		71.0		73.8		72.4		73.5		69.5		69.3	
<i>Rakenneominaisuudet</i>																				
Ilmanläpäisyvastus, s/100ml	0.6	0.0	2.0	0.1	10.3	1.5	164.0	14.7	618.3	42.6	0.5	0.2	1.0	0.1	1.9	0.2	4.0	0.3	15.0	2.4
Kuivauskutistuma, %	3.8	0.5	4.1	0.2	3.9	0.4	5.3	0.4	5.7	0.5	2.8	0.2	3.0	0.3	3.0	0.4	3.3	0.5	3.7	0.4
Tiheys, g/cm3	0.442		0.515		0.568		0.639		0.672		0.402		0.455		0.485		0.519		0.556	
Paksuus, nm	664	13	554	8	491	3	436	7	423	5	721	7	637	11	606	5	536	9	498	7
Bulkki, cm3/g	2.26		1.94		1.76		1.56		1.49		2.49		2.20		2.06		1.93		1.80	
<i>Lujuusominaisuudet</i>																				
Vetolujuus, kN/m	27.1	1.1	54.9	3.4	72.3	1.6	87.4	2.3	88.1	4.1	18.0	0.5	33.6	0.6	46.6	1.6	55.5	2.4	66.0	4.6
Vetoindeksi, Nm/g	25.8		51.3		69.0		83.5		82.7		16.3		30.9		42.4		53.2		63.5	
Repäisylujuus, mN	1273	91	1403	145	1039	31	817	33	762	62	1080	42	1524	100	1455	154	1411	96	1174	113
Repäisyindeksi, mNm²/g	18.19		19.65		14.86		11.70		10.73		14.63		21.05		19.80		20.30		16.94	
Lujuustulo	469		1008		1026		977		888		239		650		839		1080		1076	
Venymä, %	4.7	0.3	4.9	0.3	5.1	0.2	5.2	0.3	5.2	0.3	3.5	0.4	4.3	0.3	4.7	0.3	4.8	0.3	4.8	0.3
Puhkaisulujuus, kPa																				
Puhkaisuindeksi, kPa m²/g	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
Taivutusvastus, mN	59	9	64	8	57	8	49	5	46	11	57	8	60	8	66	7	58	5	54	6.3
<i>Optiset ominaisuudet</i>																				
ISO-vaaleus, %	88.2	0.1	87.7	0.1	87.1	0.1	86.6	0.1	85.9	0.1	89.1	0.1	88.9	0.1	88.6	0.2	88.2	0.1	88.2	0.2
Opasiteetti, %	76.5		74.0		71.4		69.1		66.6		77.6		75.5		74.4		72.2		70.8	
Valonsirontakerroin, m²/kg	24.8		30.1		26.9		24.4		21.7		36.5		33.5		61.4		29.8		28.1	

PILOTJAUHATUSTEN TULOKSET 7 - 9.3.1995
Männyn massamäärittelykset

	MÄNTY PUOLIKUIVAMASSA										MÄNTY PUOLIKUIVANMASSA (kat.)									
	Jauhamaton		1. vaihe		2. vaihe		3. vaihe		4. vaihe		Jauhamaton		1. vaihe		2. vaihe		3. vaihe		4. vaihe	
	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
Massamäärittelykset																				
Sakeus, %	3.0		3.0		3.0		3.0		3.0		2.9		2.9		2.9		2.8		2.7	
SR-luku	13.0		16.0		33.0		33.0		48.0		13.5		18.0		24.5		49.0		67.0	
Freeness, ml	700		630		510		390		285		690		615		480		275		140	
pH	6.7		6.8		6.8		6.8		6.7		6.8		6.9		6.9		6.9		7.0	
Ca++ pitoisuus, mg/l																				
Kuidunpituus, mm	2.02		2.00		1.92		1.86		1.72		2.02		1.99		1.94		1.32		0.94	
Pituusmassa, mg/m	0.22		0.20		0.20		0.18		0.19		0.22		0.21		0.19		0.17		0.21	
Kuidun massa, 10 ⁻⁶ *g	0.43		0.39		0.38		0.34		0.33		0.44		0.41		0.37		0.22		0.20	
Arkkimäärittelykset																				
Neliömassa, g/m ²	70.0		71.1		69.8		70.0		69.3		69.8		71.8		69.8		70.0		69.5	
Rakenneominaisuudet																				
Ilmanläpäisyvastus, s/100ml	0.6	0.1	1.7	0.1	7.4	0.5	27.4	3.4	220.3	25.4	0.5	0.1	1.9	0.1	11.0	2.0	83.4	7.1	389.5	11.3
Kuivauskutistuma, %	2.8	0.4	3.3	0.3	4.1	0.3	4.2	0.4	5.0	0.4	3.3	0.3	3.6	0.4	4.1	0.4	5.1	0.6	6.6	0.7
Tiheys, g/cm3	0.417		0.500		0.559		0.577		0.630		0.418		0.509		0.562		0.610		0.656	
Paksuus, mm	671	4	569	2	499	4	484	8	439	5	668	8	564	7	498	6	458	3	424	2
Bulkki, cm3/g	2.40		2.00		1.79		1.73		1.59		2.39		1.96		1.78		1.64		1.52	
Lujuusominaisuudet																				
Vetolujuus, kN/m	26.2	1.1	51.1	1.3	69.2	2.1	76.9	2.3	88.1	3.0	24.8	0.7	53.3	1.9	70.3	1.7	73.1	2.4	71.0	2.2
Vetoindeksi, Nm/g	24.9		47.9		66.1		73.2		84.8		23.7		49.5		67.2		69.6		68.1	
Repäisylujuus, mN	1293	160	1538	198	1061	12	948	21	784	11	1181	181	1366	103	1073	19	706	20	535	12
Repäisyindeksi, mNm ² /g	18.47		21.63		15.20		13.54		11.31		16.92		19.03		15.37		10.09		7.70	
Lujuustulo	460		1036		1005		991		959		401		942		1033		702		524	
Venymä, %	4.7	0.3	5.0	0.2	5.0	0.3	5.2	0.2	5.1	0.2	4.6	0.3	5.0	0.2	4.9	0.2	5.0	0.2	4.9	0.3
Puhkaisulujuus, kPa																				
Puhkaisuindeksi, kPa m ² /g	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
Taivutusvastus, mN	53	6	61	7	50	9	57	10	50	5	49	9	57	10	51	7	50	3	39	3.6
Optiset ominaisuudet																				
ISO-vaaleus, %	90.6	0.2	89.9	0.1	89.4	0.1	89.2	0.1	88.9	0.2	90.9	0.2	90.4	0.1	90.0	0.1	88.9	0.2	88.2	0.1
Opasiteetti, %	76.5		74.4		71.5		70.3		69.0		76.0		74.1		71.4		70.4		68.9	
Valonsirontakerroin, m ² /kg	35.3		31.2		27.9		26.4		25.2		34.8		30.8		28.0		26.1		24.4	

PILOTJAUHATUSTEN TULOKSET 7 - 9.3.1995
Koivun massamäärittelykset

	KOIVU SC-TERITYS						KOIVU MX-TERITYS					
	Jauhamaton		1. vaihe		2. vaihe		3.vaihe		Jauhamaton		1. vaihe	
	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
Massamäärittelykset												
Sakeus, %	4.1		4.0		4.0		4.0		4.1		4.0	
SR-luku	20.0		27.0		37.0		50.0		20.0		33.5	
Freeness, ml	500		400		310		220		500		340	
pH	6.5		6.5		6.5		6.5		6.5		6.5	
Ca++ pitoisuus, mg/l												
Kuidunpituus, mm	1.00		0.99		0.96		0.94		1.00		0.97	
Pituusmassa, mg/m	0.11		0.11		0.11		0.12		0.11		0.11	
Kuidun massa, 10 [^] -6*g	0.11		0.11		0.11		0.11		0.11		0.11	
Arkkimäärittelykset												
Neliömassa, g/m ²	70.5		69.0		69.4		69.6		70.5		69.3	
Rakenneominaisuudet												
Ilmanläpäisyvastus, s/100ml	2.3	0.1	6.3		38.4	3.0	241.1	11.0	2.3	0.1	9.2	1.3
Kuivauskutistuma, %	2.9	0.3	2.4	0.4	2.8	0.5	3.6	0.5	2.9	0.3	2.7	0.2
Tiheys, g/cm3	0.544		0.584		0.634		0.676		0.544		0.604	
Paksuus, nm	519	2	473	3	438	3	411	1	519	2	459	3
Bulkki, cm3/g	1.84		1.71		1.58		1.48		1.84		1.66	
Lujuusominaisuudet												
Vetolujuus, kN/m	55.7	2.6	71.4	5.1	89.0	3.1	103.6	3.4	55.7	2.6	74.7	5.6
Vetoindeksi, Nm/g	52.7		69.0		85.5		99.2		52.7		71.9	
Repäisylujuus, mN	654	24	602	32	579	30	569	8	654	24	590	18
Repäisyindeksi, mNm ² /g	9.28		8.72		8.34		8.18		9.28		8.51	
Lujuustulo	488		602		713		810		488		612	
Venymä, %	4.0	0.2	4.3	0.3	4.9	0.4	4.8	0.2	4.0	0.2	4.6	0.3
Puhkaisulujuus, kPa	654	24	602	32	579	30	569	8	654	24	590	18
Puhkaisuindeksi, kPa m ² /g	9.28		8.72		8.34		8.18		9.28		8.51	
Taivutusvastus, mN	67	6	55	6	52	6	52	7	67	6	54	9
Optiset ominaisuudet												
ISO-vaaleus, %	88.9	0.1	88.5	0.1	88.0	0.2	87.1	0.1	88.9	0.1	87.9	0.2
Opasiteetti, %	76.0		72.9		70.2		67.8		76.0		72.6	
Valonsirontakerroin, m ² /kg	34.2		30.4		26.6		23.9		34.2		29.6	

TEHDASJAUHETTUIJEN HIENOPAPERIMASSA-ARKKIEN TULOKSET
Putkikoivu AA-MX -teritys ja puolikuivamänty BB - AA - BB -teritys
Massa- ja paperimääriykset

Jauhatusolosuhteet	Teh1		Teh3		Teh4		Teh6		Teh7		Teh9	
	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
EOK koivu, kWh/t	42		68		42		68		42		68	
EOK mänty, kWh/t	57		57		110		110		165		165	
Massamääriykset												
Sakeus, %												
SR-luku	19.0		20.0		21.0		21.5		22.0		23.5	
Freeness, ml	550		540		535		505		510		480	
pH												
Ca++ pitoisuus, mg/l												
Kuidunpituus, mm	1.21		1.20		1.20		1.21		1.20		1.21	
Pituusmassa, mg/m	0.15		0.18		0.16		0.16		0.16		0.17	
Kuidun massa, 10 ⁻⁶ *g	0.18		0.22		0.19		0.19		0.19		0.21	
Arkkimääriykset												
Neliömassa, g/m²	68.4		63.3		68.1		62.5		67.6		63.8	
Rakenneominaisuudet												
Ilmanläpäisyvastus, s/100ml	2.6	0.1	3.4	0.2	3.1	0.1	4.3	0.2	4.9	0.4	9.1	1.1
Kuivauksutistuma, %	3.4	0.6	3.7	0.6	3.8	0.4	4.2	0.4	3.8	0.4	3.9	0.5
Tiheys, kg/m3	532		541		546		556		564		576	
Paksuus, mm	514	3	468	4	499	3	450	6	480	3	443	6
Bulkki, m3/kg	1.88		1.85		1.83		1.80		1.77		1.74	
Lujuusominaisuudet												
Vetolujuus, kN/m	51.8	3.5	55.9	4.2	51.9	3.6	58.6	3.9	61.2	3.8	62.8	1.0
Vetoindeksi, Nm/g	50.5		58.9		50.8		62.5		60.3		65.7	
Repäisylujuus, mN	761	31	699	31	742	24	656	19	688	14	647	12
Repäisyindeksi, mNm²/g	11.13		11.04		10.90		10.50		10.18		10.14	
Lujuustulo	562		650		554		656		614		666	
Venymä, %	4.0		4.3		4.0		4.5		4.5		4.5	
Puhkaisulujuus, kPa	274	9	276	17	286	12	292	12	318	18	341	13
Puhkaisuindeksi, kPa m²/g	4.01		4.36		4.19		4.67		4.71		5.34	
Optiset ominaisuudet												
ISO-vaaleus, %	88.9	0.1	88.6	0.1	88.8	0.1	88.6	0.1	87.8	0.1	87.6	0.1
Opasiteetti, %	76.8		74.2		75.1		72.8		75.9		73.5	
Valonsirontakerroin, m²/kg	33.7		32.5		31.3		30.7		32.2		31.1	

PILOTJAUHETTUIJEN HIENOPAPERIMASSA-ARKKIEIN TUUKSET
Putkikoivu SC-teritys ja putkimäntä LM-teritys
Massa- ja paperimääritykset

Jauhatusolosuhteet	Putki1		Putki2		Putki3		Putki4		Putki5		Putki6		Putki7		Putki8		Putki9	
	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
EOK koivu, kWh/t	32		65		98		32		65		98		32		65		98	
EOK mäntä, kWh/t	60		60		60		120		120		120		180		180		180	
Massamääritykset																		
Sakeus, %																		
SR-luku	20.0		23.0		27.5		21.5		26.0		30.5		24.0		28.5		35.0	
Freeness, ml	550		495		445		510		455		390		470		410		360	
pH																		
Ca++ pitoisuus, mg/l																		
Kuidunpituus, mm	1.25		1.23		1.18		1.21		1.18		1.15		1.17		1.15		1.13	
Pituusmassa, mg/m	0.127		0.12		0.132		0.125		0.124		0.128		0.131		0.124		0.128	
Kuidun massa, 10 ⁻⁶ g	0.16		0.15		0.16		0.15		0.15		0.15		0.15		0.14		0.14	
Arkkinääritykset																		
Neliömassa, g/m ²	68.6		68.9		68.4		69.3		69.8		69.5		69.5		69.1		68.9	
Rakenneminaisuudet																		
Ilmanläpäisyvastus, s/100ml	3.4	0.2	7.2	0.6	19.7	1.1	5.5	0.4	13.9	0.9	43.8	6.6	10.5	0.8	28.0	2.0	64.3	6.9
Kuivauskutistuma, %	3.6	0.3	4.0	0.5	4.8	0.6	3.6	0.6	3.9	0.4	4.3	0.6	4.1	0.6	4.3	0.4	4.9	0.4
Tiheys, kg/m ³	562		586		612		574		601		635		597		617		638	
Paksuus, mm	489	9	470	7	447	3	483	4	464	5	438	4	466	1	448	4	432	7
Bulkki, m ³ /kg	1.78		1.71		1.63		1.74		1.66		1.58		1.68		1.62		1.57	
Lujuusominaisuudet																		
Vetolujuus, kN/m	59.9	2.4	67.9	8.9	73.7	2.9	68.1	3.7	70.8	5.3	80.9	3.6	73.3	1.3	81.1	3.8	82.9	3.1
Vetoindeksi, Nm/g	58.2		65.7		71.8		62.7		67.6		77.6		70.3		78.2		80.2	
Repäisylujuus, mN	793	11	734	24	726	10	755	9	712	25	678	9	710	28	691	18	678	40
Repäisyindeksi, mNm ² /g	11.55		10.65		10.61		10.90		10.20		9.75		10.21		9.99		9.84	
Lujuustulo	672		700		763		683		690		757		718		781		789	
Venymä, %	4.5		4.7		4.7		4.4		4.5		4.6		4.5		4.5		4.5	
Puhkaisulujuus, kPa	326	23	381	12	403	11	342	23	392	16	438	19	375	12	400	25	417	16
Puhkaisuindeksi, kPa m ² /g	4.75		5.52		5.89		4.94		5.61		6.29		5.39		5.78		6.06	
Optiset ominaisuudet																		
ISO-vaaleus, %	89.1	0.2	88.6	0.1	88.1	0.2	88.6	0.1	88.4	0.1	88.1	0.1	87.9	0.1	87.2	0.1	87.0	0.2
Opasiteetti, %	75.0		74.2		72.8		75.4		74.0		72.7		74.7		73.7		72.2	
Valonsirontakerroin, m ² /kg	30.9		29.5		27.8		31.0		28.6		27.0		29.6		28.2		26.5	

PILOTJAUHETTUIJEN HIENOPAPERIMASSA-ARKKIEIN TULOKSET

Putkikoivu SC-teritys ja puolikuivamäntä LM-teritys
Massa- ja paperimääritykset

Jauhatusolosuhteet	Seos1		Seos2		Seos3		Seos4		Seos5		Seos6		Seos7		Seos8		Seos9	
	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
EOK koivu, kWh/t	32		65		98		32		65		98		32		65		98	
EOK mäntä, kWh/t	65		65		65		129		129		129		192		192		192	
Massamääritykset	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
Sakeus, %																		
SR-luku	19.0		23.0		28.0		21.5		25.5		30.5		23.5		29.0		34.0	
Freeness, ml	550		475		425		490		445		410		470		415		350	
pH																		
Ca++ pitoisuus, mg/l																		
Kuidunpituus, mm	1.20		1.18		1.16		1.18		1.17		1.15		1.17		1.17		1.17	
Pituusmassa, mg/m	0.135		0.131		0.124		0.127		0.132		0.132		0.132		0.129		0.117	
Kuidun massa, 10 ⁻⁶ *g	0.16		0.15		0.14		0.15		0.15		0.15		0.15		0.15		0.14	
Arkkimääritykset																		
Neliömassa, g/m ²	68.6		69.0		69.6		68.5		69.0		69.5		69.0		71.8		70.1	
Rakenneominaisuudet																		
Ilmanläpäisyvastus, s/100ml	3.4	0.3	4.6	0.5	19.7	1.1	4.6	0.3	13.7	1.3	34.6	3.2	6.9	0.4	20.7	1.3	71.7	3.2
Kuivauskutistuma, %	3.6	0.4	3.9	0.6	4.6	0.4	3.5	0.5	3.8	0.5	4.4	0.6	4.0	0.5	4.4	0.6	5.0	0.4
Tiheys, kg/m ³	547		576		600		563		592		618		569		606		645	
Paksuus, nm	502	5	479	1	464	3	487	5	466	4	450	5	485	14	435	5	474	3.2
Bulkki, m ³ /kg	1.83		1.74		1.67		1.78		1.69		1.62		1.76		1.65		1.55	
Lujuusominaisuudet																		
Vetolujuus, kN/m	59.6	1.6	66.9	2.1	74.7	2.0	65.1	2.1	78.5	2.9	84.4	2.5	67.6	3.8	81.6	3.0	79.9	2.7
Vetoindeksi, Nm/g	57.9		64.6		71.5		63.3		75.8		80.9		65.3		75.8		75.9	
Repäisylujuus, mN	755	20	747	23	721	20	755	9	719	16	688	11	719	28	764	26	639	3
Repäisyindeksi, mNm ² /g	11.01		10.83		10.36		11.02		10.42		9.90		10.42		10.64		9.12	
Lujuustulo	637		699		741		698		790		801		680		807		692	
Venymä, %	4.3		4.6		4.8		4.4		4.5		4.7		4.6		4.4		4.9	
Puhkaisulujuus, kPa	316	13	355	16	395	9	339	11	390	10	416	35	355	14	404	20	439	15
Puhkaisuindeksi, kPa m ² /g	4.61		5.14		5.68		4.94		5.65		5.99		5.14		5.63		6.27	
Optiset ominaisuudet																		
ISO-vaaleus, %	89.4	0.2	88.9	0.1	88.7	0.1	89.2	0.2	88.7	0.1	88.7	0.1	88.9	0.2	88.8	0.1	88.1	0.1
Opasiteetti, %	75.6		74.6		73.6		75.0		74.0		72.8		75.0		74.7		72.8	
Valonsirontakerroin, m ² /kg	32.0		30.1		28.5		31.1		29.3		27.5		30.7		29.0		27.0	

PILOTJAUHETTUJEN HIENOPAPERIMASSA-ARKKIEN TULOKSET
Putkikoivu SC-teritys ja puolikuivamänty LM-teritys (viimeinen 3. mäntyvaihe katkova TM-teritys)
Massa- ja paperimääritykset

Jauhatusolosuhteet	Kat7		Kat8		Kat9	
EOK koivu, kWh/t	32		65		98	
EOK mänty, kWh/t	198		198		198	
Massamääritykset	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
Sakeus, %						
SR-luku	29.0		33.0		37.5	
Freeness, ml	425		370		310	
pH						
Ca++ pitoisuus, mg/l						
Kuidunpituus, mm	1.10		1.08		1.06	
Pituusmassa, mg/m	0.125		0.122		0.133	
Kuidun massa, 10 ⁻⁶ *g	0.14		0.13		0.14	
Arkkimääritykset						
Neliömassa, g/m ²	69.5		71.8		70.0	
Rakenneominaisuudet						
Ilmanläpäisyvastus, s/100ml	11.2	1.3	27.7	3.3	73.8	6.2
Kuivauskutistuma, %	3.5	0.7	4.1	0.6	4.6	0.7
Tiheys, kg/m3	590		613		639	
Paksuus, mm	471	4	468	2	438	2
Bulkki, m3/kg	1.69		1.63		1.56	
Lujuusominaisuudet						
Vetolujuus, kN/m						
Vetoindeksi, Nm/g	61.7		72.1		72.7	
Repäisylujuus, mN	638	3	653	23	609	12
Repäisyindeksi, mNm ² /g	9.18		9.09		8.70	
Lujuustulo	566		656		632	
Venymä, %	4.6	0.2	4.8	0.2	4.8	0.3
Puhkaisulujuus, kPa	349	15	406	15	410	14
Puhkaisuindeksi, kPa m ² /g	5.02		5.65		5.85	
Optiset ominaisuudet						
ISO-vaaleus, %	89.1	0.1	88.6	0.1	88.1	0.2
Opasiteetti, %	72.6		74.8		75.5	
Valonsiirontakerroin, m ² /kg	27.4		28.9		30.1	

Pilotjauhetuista massoista valmistettujen hienopaperimassojen regressiomalleja.

LEHTIPUUMASSA: Märkä koivu SC-terä, OSK 0,9 J/m, OPK 295 J/m², EOK 32 - 98 kWh/t
HAVUPUUMASSA: Märkä mänty LM-terä, OSK 4,6 J/m, OPK 990 J/m², EOK 60 - 180 kWh/t
SEOSSUHDE: Koivu 58 %, Mänty 25 % ja Hylky 17 %
MUUTTUJAT: Koivun jauhatuksen määrä = EOK_k
Männyn jauhatuksen määrä = EOK_m
HAVAINTOJEN LKM: 9

TILASUURE	REGRESSIOMALLI						
	VAKIO	EOK_k	EOK_m	EOK_k x EOK_m	EOK_k^2	EOK_m^2	R^2
Freeness	647.197	-1.69192	-0.69444				0.996
SR-luku	14.975	0.08586	0.01850	4.419E-04			0.993
Kuidunpituus	1.339	-0.00131	-0.00083	3.790E-06			0.983
Ilmanläpäisyvastus	25.230	-0.99561	-0.10638	4.735E-03	7.499E-03		0.994
Kuivauskutistuma	4.147	0.01364	-0.02167			1.019E-04	0.906
Tiheys	521.879	0.76768	0.25556				0.979
Paksuus	519.832	-0.61212	-0.16889				0.980
Vetoindeksi	46.649	0.19394	0.09167				0.953
Repäisyindeksi	12.142	-0.01242	-0.00769				0.861
Lujuustulo	690.192	1.19192	-1.38611			7.546E-03	0.911
Puhkaisuindeksi	4.196	0.01596	0.00292				0.916
Vaaleus	88.855	-0.12121	0.01528			-1.065E-04	0.969
Opasiteetti	76.285	-0.03058		-5.661E-05			0.971
Valonsirontakerroin	33.437	-0.05152	-0.01083				0.979

Pilotjauhetuista massoista valmistettujen hienopaperimassojen regressiomalleja.

LEHTIPUUMASSA: Märkä koivu SC-terä, OSK 0,9 J/m, OPK 290 J/m², EOK 32 - 98 kWh/t
HAVUPUUMASSA: Märkä mänty 50 % / kuiva mänty 50 % LM-terä, OSK 4,6 J/m, OPK 990 J/m², EOK 65 - 192 kWh/t
SEOSSUHDE: Koivu 58 %, Mänty 25 % ja Hylky 17 %
MUUTTUJAT: Koivun jauhatuksen määrä = EOK_k
Männyn jauhatuksen määrä = EOK_m
HAVAINTOJEN LKM: 9

TILASUURE	REGRESSIOMALLI						
	VAKIO	EOK_k	EOK_m	EOK_k x EOK_m	EOK_k^2	EOK_m^2	R^2
Freeness	627.071	-1.64141	-0.56426				0.971
SR-luku	11.073	0.14394	0.04330				0.993
Kuidunpituus	1.274	-0.00097	-0.00092	4.770E-06		2.060E-06	0.967
Ilmanläpäisyvastus	41.375	-1.43397	-0.18789	5.779E-03	9.627E-03		0.966
Kuivauskutistuma	4.018	0.01515	-0.02113			9.550E-05	0.981
Tiheys	497.503	0.92929	0.25461				0.977
Paksuus	529.394	-0.63030	-0.13197				0.925
Vetoindeksi	32.154	0.21111	0.36652			-1.191E-03	0.915
Repäisyindeksi *							
Lujuustulo *							
Puhkaisuindeksi	3.842	0.01626	0.00426				0.975
Vaaleus	89.884	-0.01010	-0.00315				0.856
Opasiteetti	78.310	-0.03232	-0.03199			1.112E-04	0.944
Valonsirontakerroin	35.169	-0.05455	-0.02585			6.073E-05	0.998

* Koetuloksilla ei saatu hyvää selittävää mallia

Tehdasjauhetuista massoista valmistettujen hienopaperimassojen regressiomalleja.

LEHTIPUUMASSA: Märkä koivu AA/FF-terä, OSK 2,6/1,0 J/m, OPK 610/290 J/m², EOK 42 - 68 kWh/t
HAVUPUUMASSA: Märkä mänty BB/AA/BB-terä, OSK 6,5/3,4/6,5 J/m, OPK 1120/800/1120 J/m², EOK 57 - 165 kWh/t
SEOSSUHDE: Koivu 58 %, Mänty 25 % ja Hylky 17 %
MUUTTUJAT: Koivun jauhatuksen määrä = EOK_k
Männyn jauhatuksen määrä = EOK_m
HAVAINTOJEN LKM: 6

TILASUURE	REGRESSIOMALLI						
	VAKIO	EOK_k	EOK_m	EOK_k x EOK_m	EOK_k^2	EOK_m^2	R^2
Freeness	620.588	-0.89744	-0.46291				0.961
SR-luku	15.723	0.03847	0.03007				0.977
Kuidunpituus *							
Ilmanläpäisyvastus	-3.920	0.07949	0.03372				0.812
Kuivauskutistuma	1.622	0.01154	0.02824			-1.126E-04	0.931
Tiheys	496.289	0.39744	0.31041				0.994
Paksuus	598.300	-1.69231	-0.26648				0.988
Vetoindeksi	31.604	0.32692	0.07709				0.918
Repäisyindeksi	11.953	-0.00641	-0.00862				0.952
Lujuustulo	410.032	3.14103	0.30764				0.909
Puhkaisuindeksi *							
Vaaletus	88.297	-0.00897	0.02571			-1.596E-04	0.998
Opasiteetti	84.804	-0.09359	-0.09555			3.971E-04	0.998
Valonsirontakerroin	40.390	-0.03718	-0.11917			4.763E-04	0.983

Pilotjauhetuista massoista valmistettujen hienopaperimassojen regressiomalleja.

LEHTIPUUMASSA: Märkä koivu SC-terä, OSK 0,9 J/m, OPK 295 J/m², EOK 32 - 98 kWh/t
HAVUPUUMASSA: Märkä mänty 50 % / kuiva mänty 50 % LM/TM-terä. OSK 4,6/3,7 J/m. OPK 990/1220. J/m² EOK 65 - 198 kWh/t
SEOSSUHDE: Koivu 58 %, Mänty 25 % ja Hylky 17 %
MUUTTUJAT: Koivun jauhatuksen määrä = EOK_k
Männyn jauhatuksen määrä = EOK_m
MUUTA: Männyn jauhatuksen viimeisenä vaiheena on ollut katkova teritys
HAVAINTOJEN LKM: 9

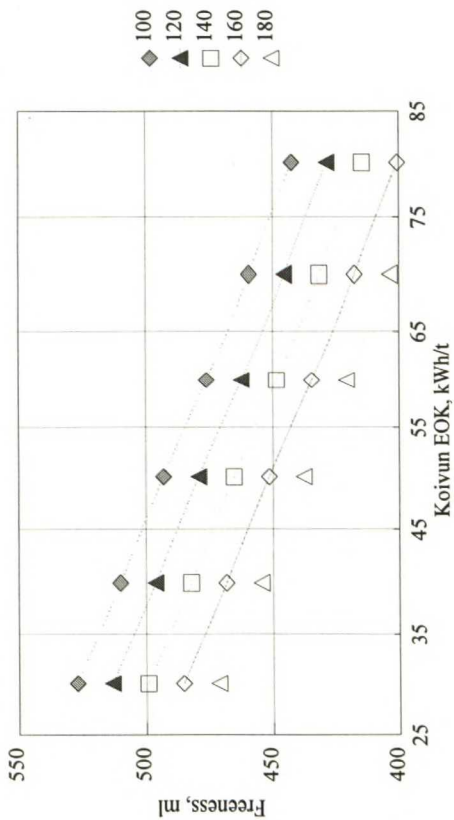
TILASUURE	REGRESSIOMALLI						
	VAKIO	EOK_k	EOK_m	EOK_k x EOK_m	EOK_k^2	EOK_m^2	R^2
Freeness	651.867	-1.61616	-0.86849				0.961
SR-luku	17.671	0.08410	-0.05898		3.826E-04	5.054E-04	0.999
Kuidunpituus	1.164	-0.00056	0.00132			-7.880E-06	0.997
Ilmanläpäisyvastus	32.383	-1.24265	-0.13042	5.299E-03	8.463E-03		0.972
Kuivauskutistuma	3.532	0.01566	-0.01063			4.137E-05	0.978
Tiheys	502.540	0.79293	0.29870				0.996
Paksuus	526.751	-0.54444	-0.16638				0.946
Vetoindeksi	29.362	0.21313	0.42807			-1.509E-03	0.919
Repäisyindeksi	10.688	-0.01136	0.02009			-1.259E-04	0.978
Lujuustulo	213.013	5.65641	5.78579		-3.290E-02	-2.411E-02	0.976
Puhkaisuindeksi	3.379	0.01485	0.01526			-4.727E-05	0.961
Vaaletus	89.939	-0.01111	-0.00302				0.892
Opasiteetti	79.790	-0.08046	-0.03895	5.655E-04			0.679
Valonsirontakerroin	38.321	-0.11566	-0.05697	7.151E-04			0.829

* Koetuloksilla ei saatu hyvää selittävää mallia

KOIO PAPERIARKKIEN REGRESSIOKÄYRÄSTÖT

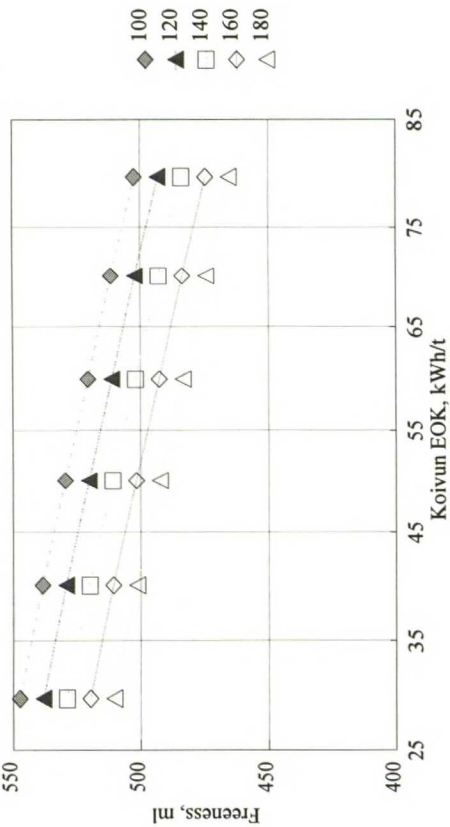
Putkimänty ja -koivu (pilot)

$R^2 = 0.996$



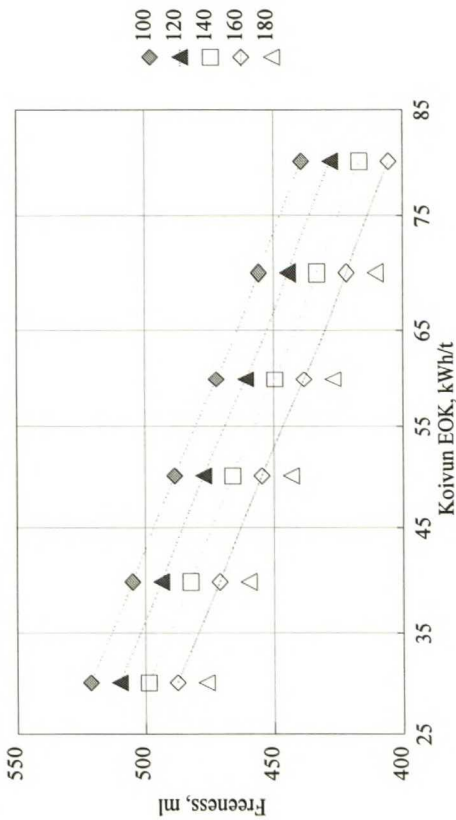
Puolikuiva mänty ja putkikoivu (tehdas)

$R^2 = 0.961$



Puolikuiva mänty ja putkikoivu (pilot)

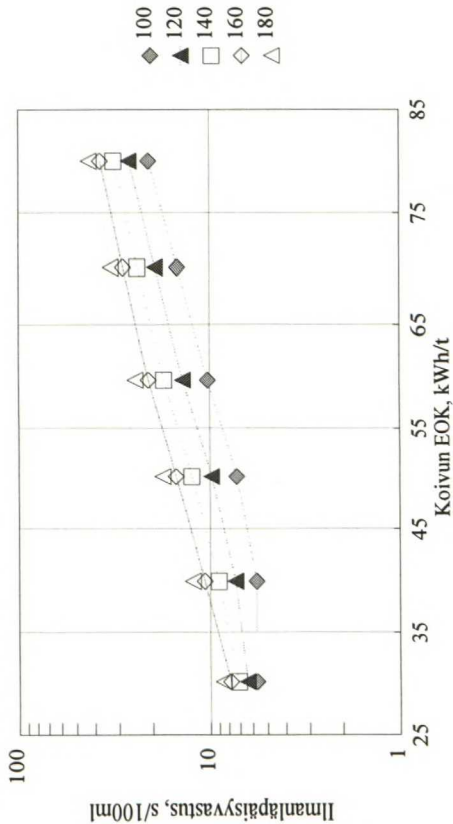
$R^2 = 0.971$



KOPIOAPERIARKKIEN REGRESSIOKÄYRÄSTÖT

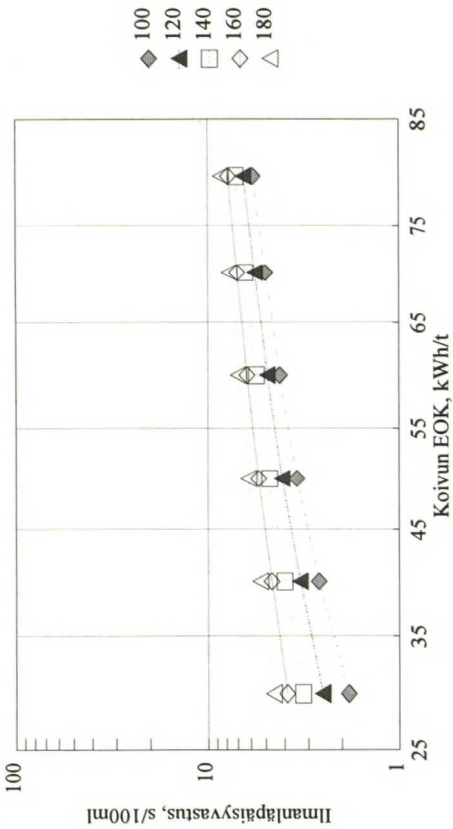
Putkimänty ja -koivu (pilot)

R² = 0.996



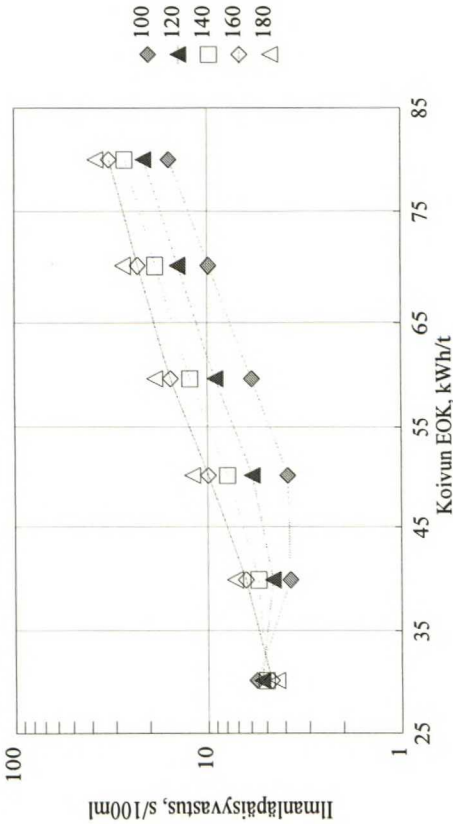
Puolikuiva mänty ja putkikoivu (tehdas)

R² = 0.961



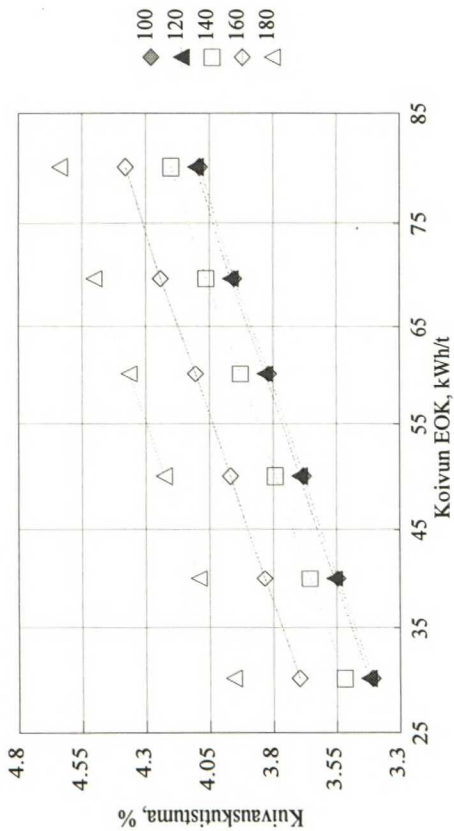
Puolikuiva mänty ja putkikoivu (pilot)

R² = 0.971

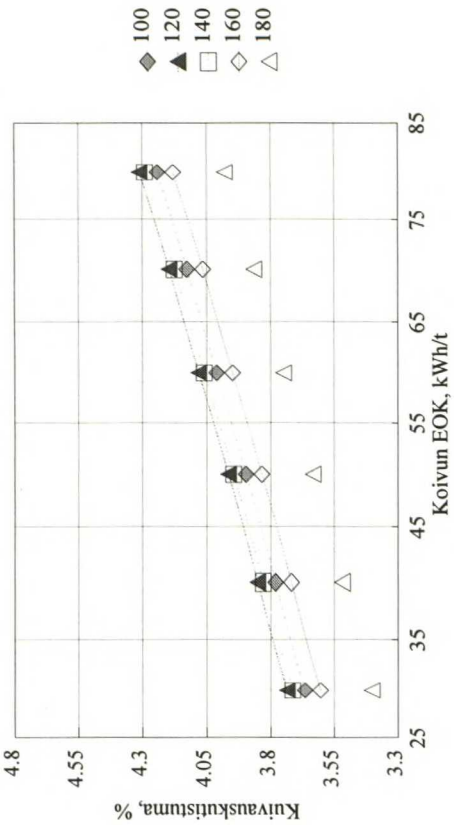


KOPIOPAPERIARKKIEN REGRESSIOKÄYRÄSTÖT

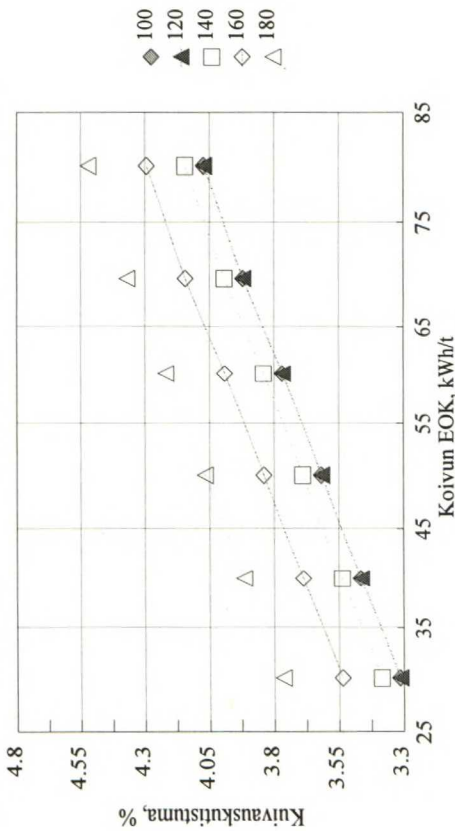
Putkimänty ja -koivu (pilot) $R^2 = 0.996$



Puolikuiva mänty ja putkikoivu (tehdas) $R^2 = 0.961$



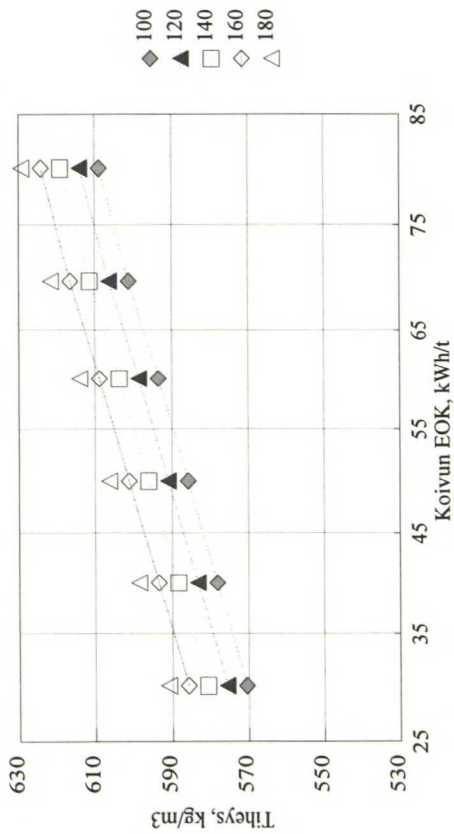
Puolikuiva mänty ja putkikoivu (pilot) $R^2 = 0.971$



KOPIOPAPERIARKKIEN REGRESSIOKÄYRÄSTÖT

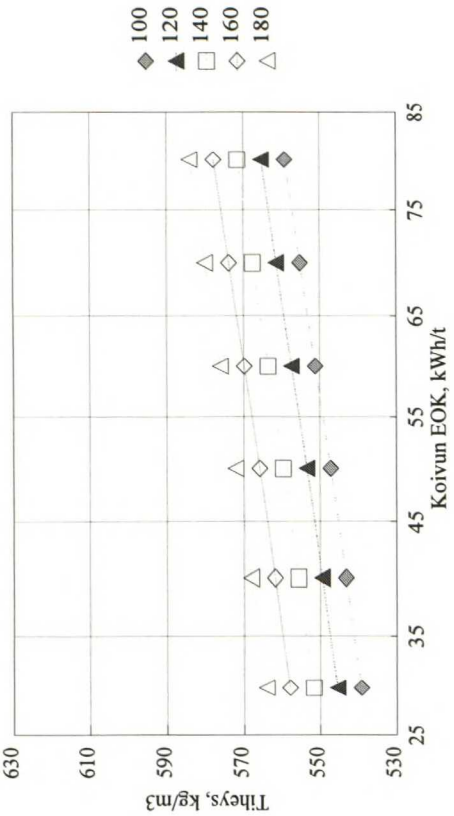
Putkimänty ja -koivu (pilot)

R² = 0.996



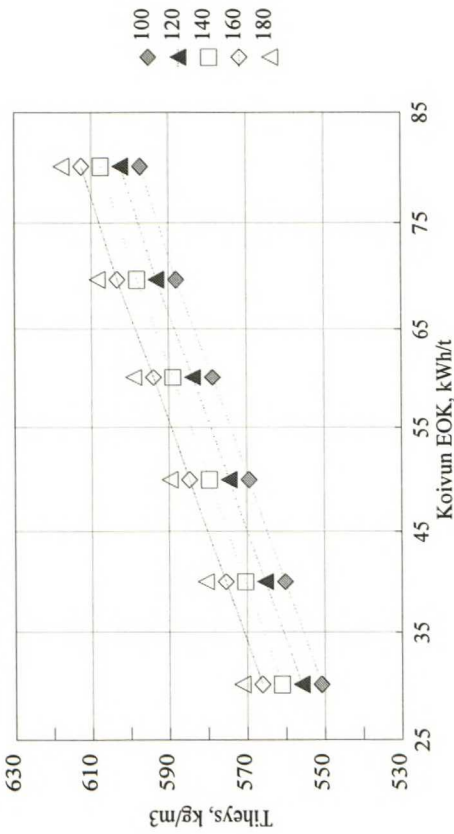
Puolikuiva mänty ja putkikoivu (tehdas)

R² = 0.961

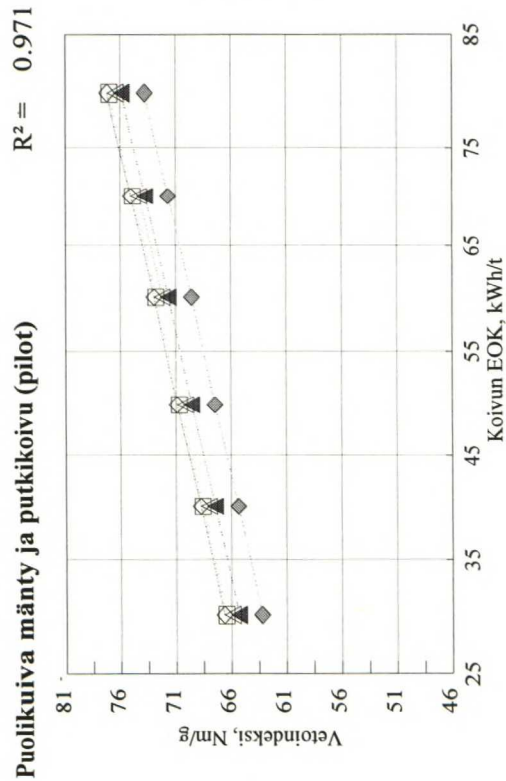
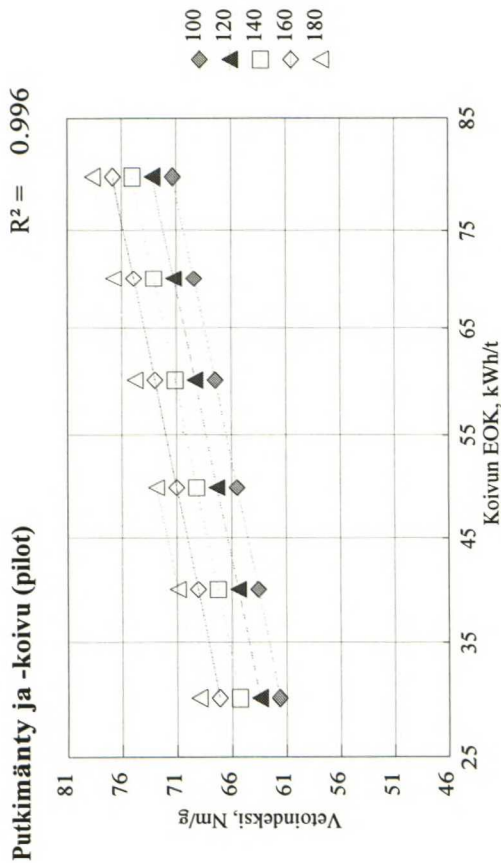
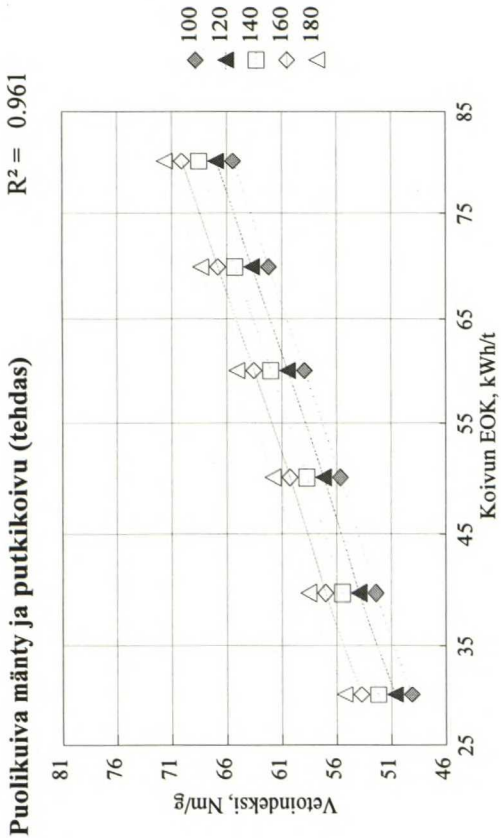


Puolikuiva mänty ja putkikoivu (pilot)

R² = 0.971



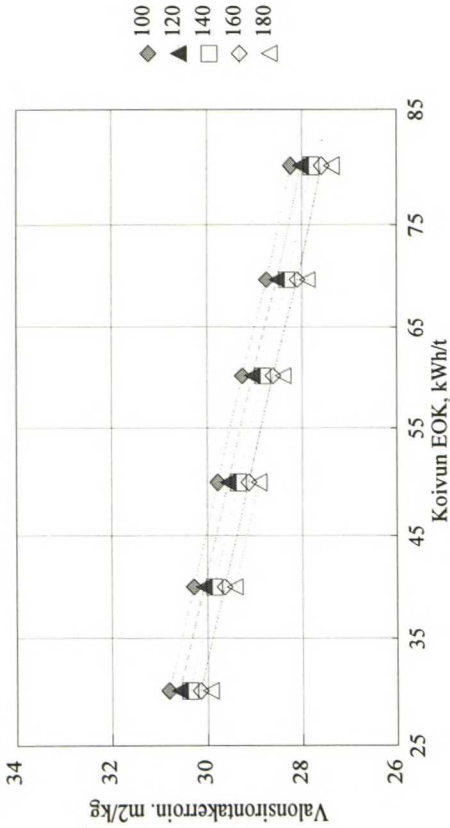
KOPIOAPERIARKKIEN REGRESSIOKÄYRÄSTÖT



KOPIOPAPERIARKKIEN REGRESSIOKÄYRÄSTÖT

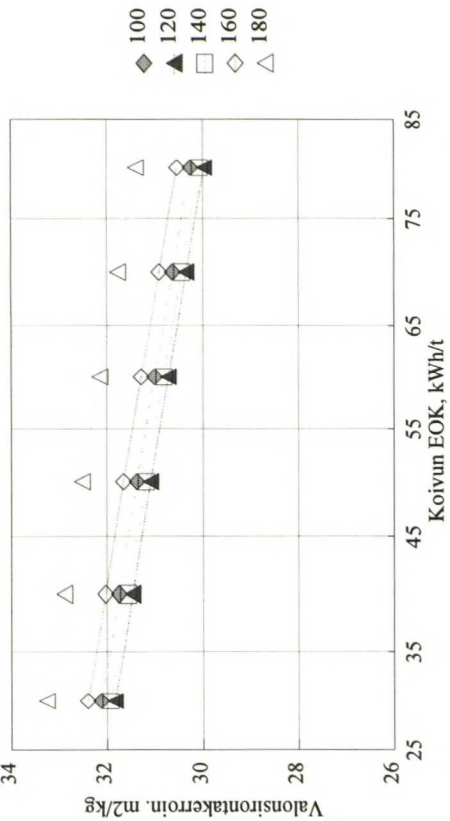
Putkimänty ja -koivu (pilot)

R² = 0.996



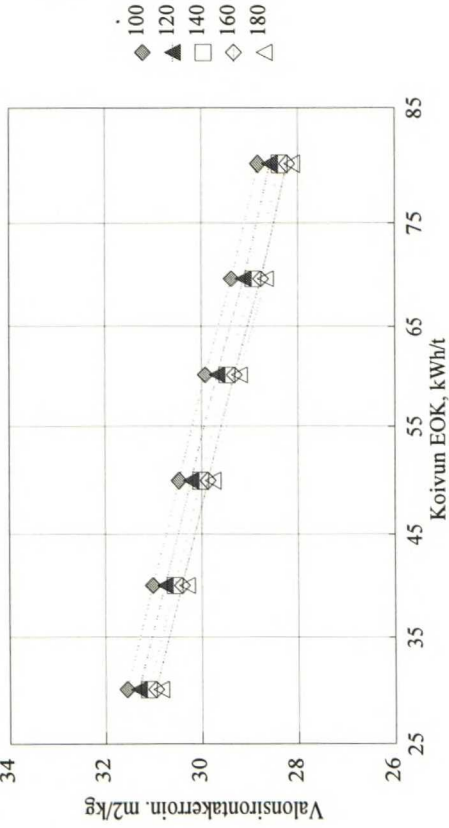
Puolikuiva mänty ja putkikoivu (tehdas)

R² = 0.961



Puolikuiva mänty ja putkikoivu (pilot)

R² = 0.971



TEHDASKOEAJO 12 - 13.6.1995
Männyn massamäärittelykset

Jauhatusolosuhteet	MÄNTY PUOLIKUIVA						MÄNTY PUTKI					
	1. vaihe		2. vaihe		3. vaihe		1. vaihe		2. vaihe		3. vaihe	
	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
EOK mänty, kWh/t	15				64				60		181	
Massamäärittelykset												
Sakeus, %	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.7	4.6	4.6	4.6	4.6	4.8	4.7
SR-luku	13.0	14.5	16.5	15.0	15.0	18.0	14.0	14.0	16.0	16.0	18.0	17.0
Freeness, ml	708	4	628	4	680	0	645	0	655	0	593	0
pH	7.4	7.4	7.5	7.2	7.2	7.4	7.3	7.6	7.5	7.4	7.4	7.5
Ca++ pitoisuus, mg/l			52.0			54.0					54.0	
Kuidunpituus, mm	2.29	2.29	2.27	2.22	2.22	2.19	2.24	2.24	2.24	2.24	2.27	2.22
Pituusmassa, mg/m	0.19	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19	0.18	0.20	0.19	0.20	0.19	0.20
Kuidun massa, 10 ⁻⁶ *g	0.43	0.42	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.44	0.43	0.45	0.45	0.44
Arkkinämäärittelykset												
Neliömassa, g/m ²	69.5	68.8	68.8	69.5	69.5	68.5	69.6	68.8	70.1	67.8	70.1	70.0
Rakennemäärittelykset												
Ilmanlämpöisyys, s/100ml	0.6	0.2	1.3	0.2	0.6	0.7	1.7	0.2	0.1	0.3	0.4	0.2
Kuivauskutistuma, %	3.5	0.5	3.6	0.4	0.3	3.7	4.0	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5
Tiheys, kg/m ³	447	503	542	463	516	549	516	482	539	557	450	536
Paksuus, mm	622	7	547	9	601	12	540	3	521	7	487	523
Bulkki, cm ³ /g	2.24	1.99	1.85	2.16	1.94	1.82	1.94	2.07	1.86	1.80	2.22	1.87
Lujuusominaisuudet												
Vetolujuus, kN/m	31.0	1.2	47.2	1.7	39.6	1.0	54.0	4.5	1.3	59.0	65.6	52.1
Vetoindeksi, Nm/g	29.7	45.8	58.7	38.0	51.7	62.9	51.7	45.0	56.1	64.5	64.5	50.1
Repäisylujuus, mN	1422	282	1385	117	1255	38	1332	87	192	1236	1119	1359
Repäisyyndeksi, mNm ² /g	20.45	20.14	18.25	20.51	19.13	16.87	19.13	22.34	17.62	16.51	19.25	19.58
Lujuustulo	607	922	1071	779	989	1061	989	1005	988	1065	674	981
Venymä, %	4.8	0.4	4.8	0.3	4.8	0.3	5.1	0.4	0.1	4.9	5.1	5.2
Puhkaisulujuus, kPa	195.5	15.8	303.5	13.0	367.5	15.9	315.8	9.0	348.2	23.9	376.3	310.4
Puhkaisuindeksi, kPa m ² /g	2.79	4.42	5.35	3.16	4.54	5.39	4.54	3.88	4.96	5.55	3.22	4.47
Optiset ominaisuudet												
ISO-vaaleus, %	89.5	0.2	88.9	0.1	88.5	0.2	89.2	0.1	87.8	0.0	87.8	88.3
Opasiteetti, %	75.6	73.4	71.6	74.4	71.6	70.5	72.5	73.5	72.2	69.1	75.1	72.7
Valonsirontakerroin, m ² /kg	33.3	30.1	27.7	31.8	29.0	26.7	29.0	30.6	28.0	25.8	32.6	29.5

TEHDASKOEAJO 12 - 13.6.1995
Koivun massamääritykset

KOIVU															
Jauhatusolosuhteet		Jauhamaton		1 1. vaihe		2 1. vaihe		2 2. vaihe		Jauhamaton		1 1. vaihe		2 1. vaihe	
EOK koivu, kWh/t		0		53		6		50		0		81		43	
Massamääritykset		ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.	ka.	haj.
Sakeus, %		4.0		4.3		4.2		4.3		4.1		4.3		4.2	
SR-luku		16.0		22.0		17.5		22.5		15.5		31.0		19.0	
Freeness, ml		580	0	485	4	565	0	480	0	583	4	395	7	523	4
pH		6.5		6.5		6.6		6.6		6.6		6.4		6.5	
Ca++ pitoisuus, mg/l								31.0							
Kuidunpituus, mm		1.01		1.01		1.02		1.01		1.02		1.00		1.00	
Pituusmassa, mg/m		0.11		0.10		0.10		0.11		0.11		0.11		0.11	
Kuidun massa, 10 ⁶ -g		0.12		0.11		0.11		0.11		0.11		0.11		0.11	
Arkkimääritykset															
Neliömassa, g/m ²		70.1		69.3		70.4		69.6		71.0		72.0		69.9	
Rakenneominaisuudet															
Ilmanläpäisyvastus, s/100ml		1.1	0.1	3.9	0.3	1.7	0.2	4.2	0.3	1.1	0.1	15.9	1.0	3.0	0.4
Kuivauskuutistuma, %		2.9	0.8	3.3	0.6	3.0	0.4	3.3	0.4	2.8	0.4	3.9	0.4	3.4	0.4
Tiheys, kg/m ³		477		559		520		563		475		606		554	
Paksuus, mm		588	6	496	4	542	6	495	4	598	8	475	2	505	3
Bulkki, cm ³ /g		2.10		1.79		1.92		1.78		2.11		1.65		1.81	
Lujuusominaisuudet															
Vetolujuus, kN/m		37.7	2.4	64.8	2.8	51.1	1.4	66.3	3.9	36.9	2.1	78.5	1.9	59.4	3.0
Vetoindeksi, Nm/g		35.8		62.4		48.4		63.5		34.6		72.7		56.7	
Repäisylujuus, mN		502	50	608	19	569	50	643	38	539	42	644	23	581	35
Repäisyindeksi, mNm ² /g		7.16		8.78		8.08		9.23		7.59		8.94		8.31	
Lujuustulo		256		548		391		586		263		650		471	
Venymä, %		3.8	0.4	4.8	0.2	4.2	0.2	4.7	0.2	3.2	0.3	5.2	0.2	4.4	0.3
Puhkaisulujuus, kPa		190.8	4.8	344.4	11.3	256.5	10.6	348.8	8.2	179.8	15.1	427.3	33.9	311.1	34.0
Puhkaisuindeksi, kPa m ² /g		2.70		5.00		3.70		5.00		2.50		5.90		4.50	
Optiset ominaisuudet															
ISO-vaaleus, %		88.0	0.1	86.9	0.1	88.0	0.1	87.6	0.1	88.2	0.1	85.9	0.1	87.3	0.1
Opasiteetti, %		78.8		75.2		76.8		75.6		78.9		74.8		75.4	
Valonsirontakerroin, m ² /kg		37.9		31.9		34.4		32.8		37.9		29.7		32.4	

TEHDASKOEAJO 12 - 13.6.1995
Perälaatikkomäärittelykset

	PL1	PL2	PL3	PL4	PL5	PL6	PL7	PL8
Sakeus, %	0.68	0.70	0.68	0.66	0.67	0.65	0.66	0.67
pH	7.9	8.0	8.2	8.1	8.4	8.4	8.4	8.2
Ca++ , mg/l				31				32
Keskikuidunpituus, mm	1.31	1.30	1.30	1.30	1.29	1.31	1.30	1.28
Pituusmassa, mg/m	0.207	0.206	0.207	0.205	0.209	0.205	0.201	0.205
Freeness, ml	485	480	430	455	465	505	465	445

TEHDASKOEAJON PERÄLAATIKKO JA PAPERIMÄÄRITYSTEN VASTETAULUT

		A	B	AxB	C	AxC	BxC	D
Vetoindeksi ks	Taso 1	68.1	67.4	68.1	67.1	67.6	66.5	67.4
	Taso 2	68.6	69.3	68.6	69.6	69.1	70.2	69.3
Vetoindeksi ps	Taso 1	25.5	25.5	25.6	25.5	25.6	25.7	25.8
	Taso 2	25.6	25.5	25.4	25.5	25.5	25.4	25.2
Repäisyindeksi ks	Taso 1	7.03	7.00	6.90	6.85	6.97	6.97	7.07
	Taso 2	6.87	6.90	7.00	7.05	6.93	6.93	6.83
Repäisyindeksi ps	Taso 1	8.58	8.44	8.60	8.53	8.60	8.57	8.49
	Taso 2	8.56	8.70	8.54	8.60	8.53	8.56	8.64
Lujuustulo ks	Taso 1	491.3	484.0	481.8	472.0	483.8	475.5	488.8
	Taso 2	470.8	478.0	480.3	490.0	478.3	486.5	488.8
Lujuustulo ps	Taso 1	218.5	215.8	220.5	218.0	220.3	220.0	219.3
	Taso 2	219.3	222.0	217.3	219.8	217.5	217.8	218.5
Palstautumislujuus	Taso 1	212.8	183.3	208.5	208.5	211.3	198.8	198.5
	Taso 2	200.8	230.3	205.0	205.0	202.3	214.8	215.0
Taivutusjäykkyys ks	Taso 1	101.5	106.5	109.0	113.3	112.3	111.3	113.8
	Taso 2	121.0	116.0	113.5	109.3	110.3	111.3	108.8
Taivutusjäykkyys ps	Taso 1	45.3	47.3	47.3	46.3	49.8	46.3	49.3
	Taso 2	49.5	47.5	47.5	48.5	45.0	48.5	45.5
Opasiteetti	Taso 1	91.8	91.9	91.9	92.1	92.0	92.1	92.1
	Taso 2	92.2	92.1	92.2	92.0	92.0	92.0	92.0
Valonsirontakerroin	Taso 1	58.3	56.7	56.5	57.9	56.3	58.1	56.1
	Taso 2	55.8	57.4	57.6	56.2	57.8	56.0	58.0
Karheus vp	Taso 1	179.0	181.5	173.0	177.3	178.3	172.8	177.3
	Taso 2	171.0	168.5	177.0	172.8	171.8	177.3	172.8
Karheus yp	Taso 1	203.5	201.3	194.0	203.5	200.3	186.0	196.8
	Taso 2	189.3	191.5	198.8	189.3	192.5	206.8	196.0
Huokoisuus Bendsen	Taso 1	1005.5	1132.8	1016.8	1000.0	1049.0	1015.8	1089.8
	Taso 2	1046.0	918.8	1034.8	1051.5	1002.5	1035.8	961.8
Ilmanläpäisyvastus Gurley	Taso 1	12.5	10.8	11.8	13.0	12.0	12.3	11.3
	Taso 2	12.0	13.8	12.8	11.5	12.5	12.3	13.3
Formaatioindeksi	Taso 1	71.1	67.1	70.7	71.9	70.2	72.0	70.2
	Taso 2	71.0	74.9	71.3	70.1	71.8	70.1	71.8
Kupruilu (ilmastoinnin jälk.)	Taso 1	0.090	0.111	0.109	0.099	0.109	0.108	0.097
	Taso 2	0.127	0.107	0.108	0.118	0.108	0.109	0.120
Yläviiravesi	Taso 1	911	173	693	911	1114	867	453
	Taso 2	780	1517	997	780	576	824	1238
Flokki intensiteetti	Taso 1	5.1	5.3	5.1	5.1	5.2	5.0	5.2
	Taso 2	5.1	4.9	5.1	5.1	4.9	5.1	4.9
Kutistuma	Taso 1	2.18	2.04	2.15	2.20	2.19	2.13	2.15
	Taso 2	2.13	2.28	2.16	2.12	2.13	2.19	2.16
Perälaatikko freeness	Taso 1	462.5	483.8	468.8	461.3	466.3	462.5	477.5
	Taso 2	470.0	448.8	463.8	471.3	466.3	470.0	455.0
Käyristyminen (lamppu) vp	Taso 1	17.3	19.5	18.5	17.3	19.8	17.5	20.0
	Taso 2	19.0	16.8	17.8	19.0	16.5	18.8	16.3
Imu 2. kammio	Taso 1	72.5	70.5	72.5	73.0	72.0	73.0	71.5
	Taso 2	72.5	74.5	72.5	72.0	73.0	72.0	73.5
Miehitysluku	Taso 1	28.0	27.7	27.9	27.6	27.5	27.2	27.6
	Taso 2	27.2	27.5	27.3	27.5	27.7	27.9	27.5
Höyryn kulutus	Taso 1	1.7	2.2	2.7	1.6	2.1	2.6	2.1
	Taso 2	2.5	2.0	1.5	2.6	2.1	1.6	2.1

Diplomityössä käytetyt standardit ja menetelmät:

SCAN C19:65	SR-luku
SCAN C21:65	CSF-luku
SCAN C18:65	Kemiallisen massan hajottaminen
SCAN C3:61	Massan kuiva-aine
SCAN C17:64	Massalietteen kuiva-aine
SCAN C26:67	Laboratorioarkkien valmistaminen
SCAN P2:75	Näytteiden ilmastointi testausta varten
SCAN P6:75	Neliömassa
SCAN P7:75	Paksuus, tiheys, bulkki (L&W)
SCAN P5:63	Tuhka 925 C
SCAN P21:67	Karheus (Bendtsen)
SCAN P60:87	Huokoisuus (Bendtsen)
SCAN P19:78	Ilmanläpäisyvastus (Gurley)
SCAN P3:93	Vaaleus ISO
SCAN P8:75	Opasiteetti
SCAN P8:93	Valonsirontakerroin
SCAN P63:90	IGT pintalujuus
SCAN C28:76	Vetolujuus, venymä, repäisy- ja puhkaisulujuus
SCAN P29:84	Taivutusjäykkyys
KCL 225:89	Keskikuidunpituus ja pituusmassa FS-200

Palstautumislujuus (Scott-Bond)

Formaatioindeksi (PaperLab, optinen mittaus, alue 20-122,4)

Kupruilu (KCL:n kupruilu analysaattori, OPSCO)

KUIVAUSKUTISTUMAN MÄÄRITYS

- KCL-arkkimuotilla tehdään 70 g/m² arkkeja (1 - 5) kappaletta
- painotetaan märkää arkkiä huopautuspainolla 20 s ajan
- imukartongit arkin molemmille puolille
- puristetaan arkkeja 0,35 MPa paineessa 4 min ajan
- poistetaan arkin toiselta puolelta imukartonki
- märkä arkki reijitetään vakiosabluunalla
- poistetaan imukartonki varovasti (venyttämättä märkää arkkiä) ja laitetaan märkä arkki kylmään kuivatusrumpuun
- kuivausaika 2 h 15 min
- ilmastoidaan, RH-kosteus 50 %, lämpötila 23 °C olosuhteissa 4 h
- mitataan työntömitalla reikien (keskipisteistä) välinen etäisyys kaikilta neljältä sivulta
- lasketaan pisteiden välisten etäisyyksien erotus %:na alkuperäisestä mitasta

$$\% = (52,08 - K) * 100 / 52,08$$

missä 52,08 cm = vakio, märän arkin reikien etäisyyksien summa

K = kuivan arkin reikien etäisyyksien summa

KUUSAHILPH

~~TEKNILLINEN KORKEAKOULU~~
~~Puunjalostustekniikan laitos~~
~~Kirjasto~~
~~Vuorimiehentie 1~~
~~02150 Espoo~~